

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年3月31日現在

機関番号	17102
研究種目	基盤研究(B)
研究期間	2010~2012
課題番号	22360238
研究課題名(和文)	複雑都市キャノピーがもたらす熱・空気力学フォーシング効果の解明とモデル化
研究課題名(英文)	Analysis and modeling on thermal and aero-dynamical forcing effect brought by urban canopy.
研究代表者	
	谷本 潤 (TANIMOTO JUN)
	九州大学・総合理工学研究院・教授
	研究者番号：60227338

研究成果の概要（和文）：

一連の風洞模型実験、Large Eddy Simulation (LES) に基づく数値実験により、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の熱・空気力学フォーシング（強制力）として如何に作用するかに関して、その素過程解明の端緒を得た。[流体物理科学への貢献] また、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、上記の熱・空気力学フォーシングを実際には複雑系である都市や建築の幾何形状を適切にパラメータライズすることで、バルク輸送係数としてモデル化した。[都市環境工学への貢献]

研究成果の概要（英文）：

The complete set of elaborated direct measurement systems for both drag force acting on a building blocks area and scalar flux transfer from urban canopies, which we developed in the previous project, systematic and comprehensive wind tunnel experiments to identify the so-called Bulk Drag (Momentum) Transferring Coefficient & Bulk Drag Scalar Transferring Coefficient for various urban geometric contexts were carried out. We identified a good first-step inception to get somehow universal relations of both two bulk transferring coefficients with urban geometry as long as we choose appropriate parameters. We grasped that not only building density but also slenderness of each building blocks as well as height variation, array randomness are crucially affecting on the transferring coefficients through turbulent structure brought by urban canopies. We also took other methodologies than the wind experiment; PIV technique and CFD that make sure to investigate what is really happening in and just-above urban canopies in terms of turbulent structure. LES, one of up-most CFD techniques, reveals that TOS (turbulent organized structure) emerged above canopies in connection with dynamics within canopies significantly affects on the thermal and aero-dynamical forcing effect.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2011年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2012年度	2,800,000	840,000	3,640,000
総計	13,700,000	4,110,000	17,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：都市キャノピー、風洞実験、バルク運動量輸送係数、バルクスカラー輸送係数

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的効果は surface 層の下端で流れ場に対して作用する

摩擦力（抗力, drag）に起因する。この摩擦力は地表面に近い大気の流れ、温位および比湿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を通じて擾乱（乱流エネルギー；TKE）の供給元としても作用する（例えば、Katul ら；2006 [BLM]）。抗力の生成は空気力学的には運動量の輸送（粗度表面への sink）と解釈され、街区スケールの高解像度をターゲットとする都市キャノピーモデルにおいてはバルク運動量輸送係数（バルク効力係数, Cd）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 (Ce) により表される（粗度要素から都市大気へのマクロに観た対流熱伝達率を容積比熱とスケール風速で無次元化するとバルク熱輸送係数となる）。以上述べたように都市内の粗度要素が surface 層に付与する熱・空気力学フォーシング（強制力）はバルク輸送係数により評価可能であるが、現下、それらが都市の幾何形状に大きく依存するであろうとの定性的理解が研究者間で共有されているものの、詳細な特性や輸送の物理メカニズムに関する流体科学的解明は全く進んでいない。就中、最近、乱流に関して構成論的アプローチを採る DNS (Direct Numerical Simulation) を適用することで都市キャノピーの乱流組織構造の一端が明らかにされるにつれ（例えば、Coccal ら；2006, 2007 [BLM]）、植物キャノピーと力学的には同様、少なくとも相似の機構であるとしてきた従来の描像を抜本的に見直す必要に迫られている（例えば、Watanabe; 2004 [BLM]）点からしても、都市キャノピーに特有な運動量/スカラー輸送特性の物理機構を明らかにする意義はきわめて大きいのである。

2. 研究の目的

如上の背景の元、申請者らは一連の準備研究（後述）により、バルク運動量およびバルクスカラー輸送係数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、一連の系統的験を行うことで、配置パターン、建坪率 ($\square p$) や粗度率面積密度 ($\square f$) に対する Cd 及び Ce の特性関係を整理するとともに、キャノピー直上流れ場との物理的関連性を明らかにした。得られた成果は流体物理学および境界層科学、気象学ドメインのトップ journal である Boundary-Layer Meteorology (BLM) で発表、高い評価を得ている (Hagishima, Tanimoto ら; 2009 [BLM], Narita; 2007 [BLM], Hagishima, Narita, Tanimoto; 2005 [BLM]) が、これらを足掛かりとして、学術的観点から幾つかの次ステップへの課題が

示唆されるに至った。すなわち、①都市の複雑性をモデル化するに適切な幾何パラメータの同定、②運動量輸送とスカラー輸送の物理機構上の関連性特定、③運動量/スカラー輸送特性の spatiotemporal な特性、特にその瞬時性を適切に計量することで、従来建物外の環境を定常かつ理想化された条件として捉えてきた建築環境工学への革新的インターフェイスを供示する、④Dynamic PIV を主に、LES を補完的に適用しながら、キャノピー内の高次乱流統計を面的に計測するシステムを構築し、都市キャノピーに特有の乱流構造を流体科学的に明らかにする 等々の諸点である。

3. 研究の方法

実在都市の複雑性を考慮した“乱雑さ”を粗度群の高度方向のランダムネス（粗度要素の高度分布）、平面方向のランダムネス（これは更に、配置パターンの乱雑さ、個々の粗度形状のばらつき、主風向の揺らぎに分解）に分離し、これらによる乱流混合の enhance 効果を定量的に明らかにする系統的風洞模型実験を行う。その際、準備研究により、自動車模型や人体模型と云った複雑形状の粗度要素に関するバルク輸送係数を特定したところ、2 次的な長さスケールとしては詳細な凹凸よりも形状のスレンダーさが有意に利いているとの結果も勘考した実験計画とする。以上により実在都市の複雑性を考慮したバルク運動量 Cd/スカラー輸送係数 Ce に関して、何が適切な幾何スケールパラメータとなるのかを物理的に解明した。

また、PIV (Particle Image Velocimetry) と流れ場の瞬時像を解析する CFD である LES (Large Eddy Simulation) を併用、キャノピー内の面的高次乱流統計量を計測、予測評価するシステムを確立し、キャノピー内外の乱流組織構造の相互作用を解析する。

4. 研究成果

4-1 粗度要素の形状が床面抗力に及ぼす影響に関する風洞実験

都市形状の影響を考慮した都市域の風速場予測手法の発展に資するべく様々な形状

表 1 Details of arrays used in Experiment B

Arrays	Elements	α_p	α_v
HM	Six types of miniatures of human body arranged in staggered layout. $H_{av} = 38\text{mm}$	3.05	7.8
CY-7.96	Rod array with staggered layout (diameter 25mm, H 37.5mm)	7.96	7.96
RB-1.5	Rectangular block array with staggered layout (25×25× H 37.5mm)	1.5	1.5
RB-3.13	Rectangular block array with staggered layout (12×12× H 37.5mm)	3.13	3.13
RB-7.5	Rectangular block array with staggered layout (5×5× H 37.5mm)	7.5	7.5

α_p refers frontal area to roof area ratio of roughness element, which is same as ratio of frontal area index λ_f to plan area index λ_p . α_v refers ratio of frontal area to vertically averaged plan area of roughness element.

の模型群についての床面抗力および速度プロファイルの計測を行い以下の知見を得た。

1. 自動車の精密模型による粗度群と自動車を2つの直方体で模擬した模型による粗度群では、模型の外形寸法は近いにも関わらず前者の抗力係数は後者の1~2割程度小さい値を示した。このことから、粗度要素が滑らかな曲線で構成されて

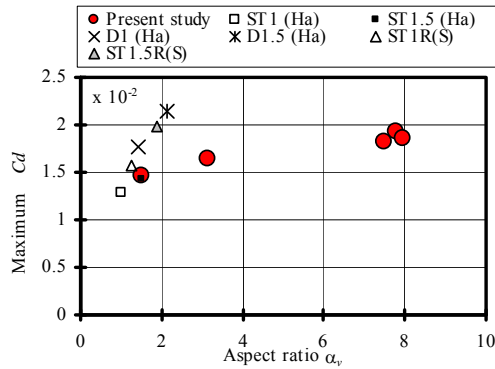


図1 Maximum drag coefficients of an array of Experiment B against aspect ratio α_v of the array. 'Present study' refers the data of RB1.5, RB-3.13, RB-7.5, CYL-7.13, and HM. Values presented in Hagishima et al (2010) and Sheikh et al. (2010) are included for a comparison.

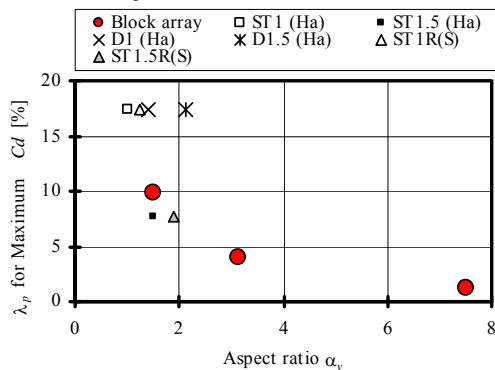


図2 Plan area index with which maximum drag coefficients of a block array takes place against aspect ratio α_v of the array. 'Block array' refers the data of RB1.5, RB-3.13 and RB-7.5. Values presented in Hagishima et al (2010) and Sheikh et al. (2010) are included for a comparison.

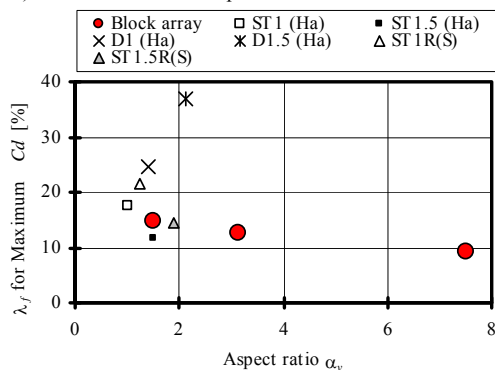


図3 Frontal area index with which maximum drag coefficient of a block array takes place against aspect ratio α_v of the array. 'Block array' refers the data of RB1.5, RB-3.13 and RB-7.5. Values presented in Hagishima et al (2010) and Sheikh et al. (2010) are included for a comparison.

いる場合には、ブロック粗度の sectional drag 係数をそのまま適用するのは困難な可能性が示唆される。

2. 複雑な形状を有する模型群による抗力は、模型の風上からの投影面積に対する平均断面積の比である α_v が等しい単純形状模型群と類似の傾向を示した。
3. 模型の風向角や模型のスレンダーさの影響を反映した粗度アスペクト比 α_v に対して、その配列における抗力係数のピーク値は線形に増加する。一方、抗力係数がピーク値を示す粗度密度条件は模型がスレンダーになるほど減少し、模型の風向角が大きくなると増加するため、粗度アスペクト比により一意に表現する事はできない。
4. スレンダーな直方体模型群のキャノピー内乱流特性は植物キャノピーのそれと類似の傾向を示す。

4-2 複雑都市形状を対象としたスカラー濃度プロファイル測定に基づく運動量・スカラー粗度相似性

複雑都市形状におけるスカラー濃度プロファイル測定に基づき、粗面乱流境界層における濃度分布と境界層発達について考察した。加えて、床面蒸発フラックスの測定値によりスカラー粗度長の同定を行い、運動量粗度長とスカラー粗度長に対して相似則が成立することを確認した。まず、高さ 1H 以下の濃度は、粗度後流部分で特になくなり、短いフェッチ距離であっても急激に粗度高さ 1H 付近まで高濃度になることが示された。濃度 1%により定義した濃度境界層高さは、主流方向に 20H 程度の距離で、整形配列で 2.5H 程度、千鳥配列で 3.5H 程度に達する。濃度境界層高さは建蔽率に依らず、整形配列よりも千鳥配列のほうが高くなるが、バルクスカラー輸送係数との関連を議論するには、更なる濃度プロファイルの測定が必要である。次に、濃度プロファイル測定結果に基づき、スカラー粗度長とゼロ面変位の同定を行った。スカラーソースが床面のみであることを考慮し、ゼロ面変位を 0 と仮定した場合のフィッティング結果を最適とした。同定され

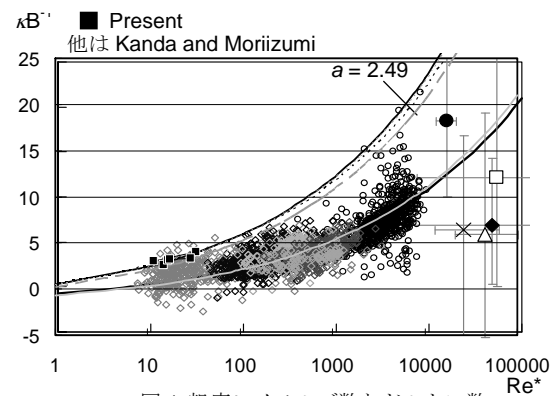


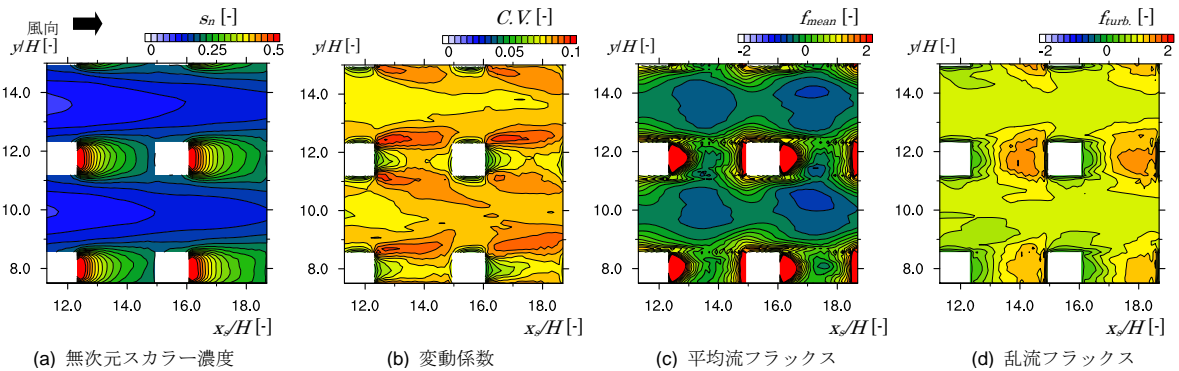
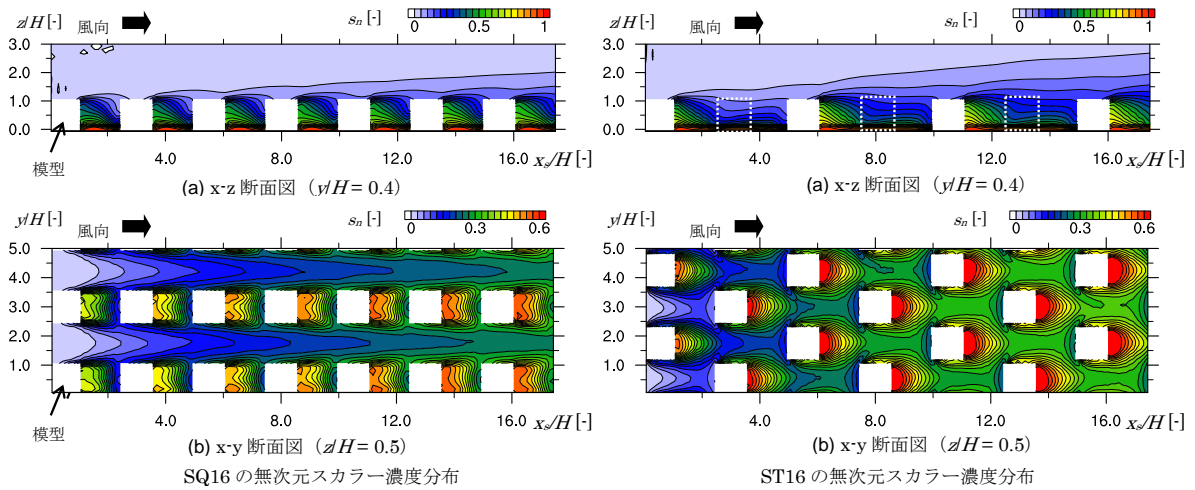
図4 粗度レイノルズ数とドラムン数

たスカラー粗度長と運動量粗度長の比であるドルトン数と粗度レイノルズ数の関係式を示し、スカラー・運動量粗度長間に相似則が成立することが確認された。最後に、対数則、Madonald による運動量粗度長およびゼロ面変位の推定式、Brutsaert による不偏関係式を適用し、スカラー輸送係数について、推定式と直接測定結果との比較を行った。

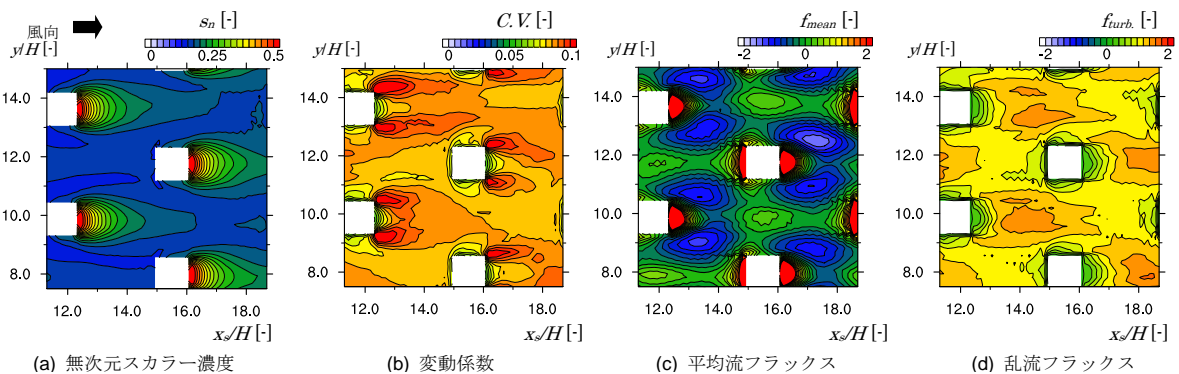
4-3 立方体粗度群床面-大気間のスカラー輸送現象に関する LES

床面にスカラーソースを設置した場合の粗面乱流境界層において、大規模な計算領域

での LES を実施し、主流方向スカラー濃度境界層の発達に着目した解析を行った。粗度形状には整形配列および千鳥配列それぞれについて建蔽率 3 条件を組み合わせた全 6 条件を対象とした。まず、スカラーソース領域上の街区平均濃度プロファイルの比較から、流れ方向距離に対応してスカラー濃度が上昇することが確認された。また、各街区のプロファイルは、1~2 街区程度で急激な変化を示し、3 街区以降の風下街区では、自己相似的となることを確認された。次に、濃度境界層は主流方向に 1~2 街区で特に急激に発達す



SQ7 におけるスカラー統計量 (x-y 断面図, $z/H=0.9$)



ST7 におけるスカラー統計量 (x-y 断面図, $z/H=0.9$)

図 5 Urban canopy 街路面からのスカラー輸送の構造

る。また、その主流方向距離はスカラースペース領域の長さではなく、街区数に強く依存している。最後に、模型周辺の濃度分布は、模型風下側周辺で高濃度となる。この分布形状は、流れ方向に大きく変化しない。これらのことは、粗面上では、粗度により三次元的に分布する気流場が大きくスカラースcalar濃度分布に影響し、滑面に比べて濃度境界層の発達の流れ方向に急峻になるということを示している。

4-4 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スcalar係数に与える影響

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。

上記した研究成果は、本プロジェクトで得られた全成果の一部のダイジェストであり、より詳細には下記の9編のpeer-review論文および講演発表論文を参照されたい。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計9件)

- (1) Nik Ibrahim, I., Ikegaya, N., Hagishima, A., Tanimoto, J.; A study on the similarity between scalar and momentum roughness lengths based on the scalar concentration measurement, Proc. of 1st Asia Conference of International Building Performance Simulation Association (ASim2012), 2012.11.
- (2) 池谷直樹, 萩島理, 谷本潤, 田中雄大; 複雑都市形状を対象としたスカラースcalar濃度プロファイル測定に基づく運動量・スカラースcalar粗度相似性の検証, 日本建築学会環境系論文集 77 (681), pp.917-923, 2012.
- (3) Razak, A.A., Hagishima, A., Ikegaya, N., Tanimoto, J.; Analysis of airflow over building arrays for assessment of urban wind environment, Building and Environment 59,

56-65, 2013.

- (4) Sheikh, A.Z., Hagishima, A., Tanimoto, J.; Experimental study of wind-induced ventilation in urban building of cube arrays with various layouts, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics 103, 31-40, 2012.
- (5) Ikegaya, N., Hagishima, A., Tanimoto, J., Tanaka, Y., Narita, K., Sheikh Ahmad, Z.; Geometric Dependence of the Scalar Transfer Efficiency over Rough Surfaces, Boundary-Layer Metrology 142 (2), 357-377, 2012.
- (6) Zaki, S.A., Hagishima, A., Tanimoto, J.; Spatial distribution of pressure drag acting on rectangular block arrays with various layouts, Proc. of 12th IBPSA Conference, CD-ROM, 2011.11.
- (7) 池谷直樹, 萩島理, 谷本潤; 立方体粗度群床面-大気間のスカラースcalar輸送現象に関するLarge-Eddy Simulation, 日本建築学会環境系論文集 76 (668), pp.943-952, 2011.10.
- (8) 萩島理, 谷本潤, 菊池圭起, 山口真人; 粗度要素の形状が床面抗力に及ぼす影響に関する風洞実験, 日本建築学会環境系論文集 76 (663), pp.485-492, 2011.
- (9) 池谷直樹, 萩島理, 谷本潤, 田中雄大, 成田健一; 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スcalar係数に与える影響, 日本建築学会環境系論文集 76 (659), pp.67-73, 2011.

[学会発表] (計21件)

- (1) 池谷直樹, 萩島理, 谷本潤, 古賀康彦, 都市キャンピースpace上空の低速流体塊による運動量輸送メカニズムに関する研究, 第26回数値流体シンポジウム, 2012.12.20, 国立オリンピック記念青少年総合センター
- (2) Izual, N.I., Ikegaya, N., Hagishima, A., Tanimoto, J., Chung, J., A study on the similarity between the scalar and momentum roughness lengths based on the scalar concentration measurement, **Asia Conference of International Building Performance Simulation Association**, 2012.11.26, Shanghai, China
- (3) 池谷直樹, 萩島理, 谷本潤, 古賀康彦, 都市キャンピースpace上空に形成される低速流体塊の統計的分析, 日本建築学会学術講演会(東海), 2012.9.14, 名古屋大学
- (4) 波多野円, 萩島理, 谷本潤, 池谷直樹, 松本健太郎, 直方体粗度群の壁面風圧に及ぼすアスペクト比の影響に関する風洞模型実験, 日本建築学会学術講演会(東海), 2012.9.14, 名古屋大学
- (5) 小野梓, 持田灯, 今野尚子, 丸山敬, 萩島理, 谷本潤, 自動車群・歩行者群等のよう

- な様々な形状・密度の一樣物体群が風環境に与える影響の予測手法の開発（その3）アスペクト比をパラメータとした Canopy モデル係数設定方法の一般化，日本建築学会学術講演会（東海），2012.9.13，名古屋大学
- (6) Razak, A. A., Ikegaya, N., Hagishima, A., Tanimoto, J., Numerical investigation of urban geometry impact on pedestrian wind environment, 7th Internatinoal Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications, 2012.9.5, Shanghai, China
- (7) Hagishima, A., Ikegaya, N., Tanimoto, J., Yamaguchi, M., Drag coefficients of staggered arrays with various block aspect ratio, ICUC-8 (8th International Conference on Urban Climates), 2012.8.8, Dublin (Ireland)
- (8) Ikegaya, N., Hagishima, A., Tanimoto, J., Tanata, Y., Izual, N. I., Wind-tunnel experiments on scalar boundary layer over cubical block arrays, ICUC-8, 2012.8.8, Dublin (Ireland)
- (9) Razak, A. A., Ikegaya, N., Hagishima, A., Tanimoto, J., Large-eddy simulation on airflow over a building arrays for assessment of well ventilated city, 5th International Building Physics Conference, 2012.5.30, Kyoto
- (10) 古賀康彦, 池谷直樹, 萩島理, 谷本潤, Large-Eddy Simulationによる都市キャノピー上空の境界層における乱流統計量の解析, 第25回数値流体シンポジウム, 2011.12.19, 大阪大学
- (11) 池谷直樹, Razak, A. A., 萩島理, 谷本潤, 単純粗度配列におけるキャノピー内風速と換気効果の推定, 第25回数値流体シンポジウム, 2011.12.19, 大阪大学
- (12) 萩島理, 山口真人, 谷本潤, 直方体粗度群の抗力係数および流体力学的パラメータに関する考察, 日本建築学会学術講演会（関東）, 2011.8.23, 早稲田大学
- (13) 池谷直樹, 萩島理, 谷本潤, 田中雄大, 成田健一, 複雑都市形状における濃度プロファイル測定に基づく運動量・スカラー粗度の相似性, 日本建築学会学術講演会（関東）, 2011.8.23, 早稲田大学
- (14) 小野梓, 今野尚子, 持田灯, 丸山敬, 萩島理, 谷本潤, 田畑侑一, 山口真人, 自動車群・歩行者群等のような様々な形状・密度の一樣物体群が風環境に与える影響の予測手法の開発（その1）高アスペクト比の粗度群を対象とした建物 Canopy モデル係数値の適用性の検証, 日本建築学会学術講演会（関東）, 2011.8.23, 早稲田大学
- (15) 今野尚子, 小野梓, 持田灯, 丸山敬, 萩島理, 谷本潤, 田畑侑一, 山口真人, 自動車群・歩行者群等のような様々な形状・密度の一樣物体群が風環境に与える影響の予測手法の開発（その2）パラメトリックスタディによる物体形状に即した Canopy モデル係数設定法の提案, 日本建築学会学術講演会（関東）, 2011.8.23, 早稲田大学
- (16) 池谷直樹, 萩島理, 谷本潤, 立方体粗度群床面 - 大気間のスカラー輸送現象に関する Large Eddy Simulation, 日本建築学会大会学術講演会（北陸）, 2010.9.10, 富山大学
- (17) 古賀康彦, 萩島理, 谷本潤, 都市内粗度要素に作用する抗力の壁面鉛直分布特性, 日本建築学会大会学術講演会（北陸）, 811-812, 2010.9
- (18) 萩島理, 谷本潤, 一次元多層都市キャノピーモデルを用いた久が原フラックス観測の追試, 日本建築学会学術講演会（北陸）, 2010.9.10, 富山大学
- (19) Zaki, S. A., Hagishima, A., Tanimoto, J., Ikegaya, N., Wind tunnel measurement of aerodynamic parameters of urban building arrays with random geometries, The 5th international symposium on Computational Wind Engineering (CWE-5), 2010.5.26, Chapel Hill (USA)
- (20) Hagishima, A., Ikegaya, N., Tanaka, Y., Tanimoto, J., Narita, K., Experimental study of geometry dependence of scalar transfer efficiency of rough surfaces, CWE-5, 2010.5.24, Chapel Hill (USA)
- (21) Ikegaya, N., Hagishima, A., Tanimoto, J., Raasch, S., Letzel, M., Large-eddy simulation of scalar transport phenomena between an urban surface and atmosphere, CWE-5, 2010.5.24, Chapel Hill (USA)
- 〔その他〕
ホームページ等
<http://ktlabo.cm.kyushu-u.ac.jp/>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
谷本 潤 (TANIMOTO JUN)
九州大学・総合理工学研究院・教授
研究者番号：60227338
- (2) 研究分担者
萩島 理 (HAGISHIMA AYA)
九州大学・総合理工学研究院・准教授
研究者番号：60294980
成田 健一 (NARITA KEN-ICHI)
日本工業大学・工学部・教授
研究者番号：20189210