

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820282

研究課題名(和文)都市キャノピー構成要素が生成する非定常・非一様気流場の数値流体解析

研究課題名(英文) Numerical simulation on turbulent flow generated by roughness elements in an urban boundary layer

研究代表者

池谷 直樹 (Ikegaya, Naoki)

九州大学・総合理工学研究科(研究院)・助教

研究者番号：70628213

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では2つの研究目的、(1) 物理的視点に基づく局所輸送メカニズムの解明、(2) 応用的視点に基づく都市内環境の評価を掲げ、研究を遂行した。その結果以下の点を示した。(a) 局所運動量輸送に作用する乱流構造の空間構造を明らかにした。(b) 都市幾何形状をパラメータとして、歩行者空間内風速が整理されることを示し、モデル式を提案した。(c) 都市キャノピー内歩行者空間風速の確率性状について、その分布形状が粗度配列にほとんど依存せず、平均風速により超過風速が精度良く予測できることを示した。(d) 都市キャノピー特有な非定常気流場と粗度壁面圧力に明確な相関があることを示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, there are two main themes：(1) investigation on turbulent transport mechanism of scalar and momentum, (2) development of evaluation method for wind environment in an urban area. The followings are shown. (a) Turbulent structure which causes large momentum transport are visualized based on conditional averaging method. (b) New prediction equation is proposed to express wind environment at a pedestrian level by using geometrical parameters. (c) Probability densities of wind speed at a pedestrian level shows similar function of normalized probability variables defined by the mean and the standard deviation of wind speed. (d) The strong correlation are observed between wind speed near roughness elements and those pressure.

研究分野：環境工学

キーワード：都市キャノピー 粗面乱流境界層 風環境

1. 研究開始当初の背景

都市表面の構造物を含む都市の接地境界層内では、構造物に作用する風による抵抗力が、都市内部の風速を低下させるのと同時に、複雑な乱れた気流場を整形する要因となる。それに加えて、乱れた気流場によって、都市内部の排熱や水蒸気などの物質が、都市内部に滞留したり都市外部へ放出されたりする現象が生じる。これらの諸現象は、複雑な形状を有する都市表面と大気間の相互作用であり、複雑な都市形状に起因する都市特有の運動量・物質輸送現象を引き起こしている。風洞実験や数値解析を用いた既往研究により、(1) 粗度密度により粗度周辺の気流パターン (flow regime) が変化するため、バルク運動量輸送係数は密度に対して上凸の分布となる、(2) 粗度要素により乱流混合が促進されるため、滑面に比べて粗面のバルク物質輸送係数が大きくなる、(3) 速度欠損による物質輸送量低下と非常常流・非一様流による物質輸送量増加の二つの効果が重畳されるため、バルク物質輸送係数も粗度密度に対して上凸の分布をとる、などの基本的特性は明らかにされているものの、残された課題も多くあり、以下に掲げる研究目的に基づき、研究を遂行した。

2. 研究の目的

(1) 都市キャノピー構成要素が生成する非常常・非一様気流場による運動量・物質輸送メカニズムを Large-Eddy simulation (LES) により分析する (物理的視点に基づく局所輸送メカニズムの解明)。サブテーマとして以下の二点の解明を試みた。

LES における壁関数による運動量、スカラーフラックス推定方法についての定量評価を行い、適切なフラックス推定方法を明らかにする。

乱流組織構造による輸送メカニズムの解明を試み、粗面乱流境界層内の運動量、スカラーフラックスの輸送における乱流構造の機能について分析する。

(2) 粗度形状が粗度周辺気流場や都市内環境に与える影響を LES により分析する (応用的視点に基づく都市内環境の評価)。サブテーマとして以下の二点の解明を試みた。

粗度形状と flow regime の関係性把握を目的とし、幾何形状と非常常・非常常気流場の関係性について考察する。

粗度周辺非常常気流場が建物換気に与える影響の解明を目的とし、非常常気流場が壁面風圧力に及ぼす影響を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 縮小模型粗度群を対象とした LES を構築し、粗面乱流境界層上の気流場・スカラー場を解析する。粗度周辺および粗度上空の風速とスカラー濃度の相関量を抽出し、乱流構造による運動量・スカラー輸送量を評価する。

(2) 粗度近傍流れを対象とした実大・準実大スケール粗度群を対象とした LES を実施し、粗度周辺気流場を三次元的可視化し、flow regime の分類を行う。また、変動風速により換気量を評価する。

4. 研究成果

(1) 乱流構造による運動量輸送

都市を模擬した単純粗度配列条件下における数値計算を LES を用いて行った。計算領域は、単純粗度高さ H に対して、 $60H \times 30H$ と非常に広く設定することで、粗度により形成されると考えられている大規模構造の形成を試みた。粗面上の大規模構造と運動量輸送の関係性を明らかにするため、都市キャノピー上空に形成される大規模構造について、運動量輸送最大点を基準とした条件付平均気流場を算出した (図 1)。また、正味運動量の下向き輸送に対する寄与を、強い上昇流による運動量輸送 (ejection, 図 1(a)) と強い下降流による運動量輸送 (sweep, 図 1(b)) の分類し、どちらの現象においても強い二つの渦が寄与していることを明らかにした。このことにより、既往研究の粗滑面で見られていた乱流構造に類似する渦構造が粗面境界層に分類される都市キャノピー上でも見られることを明らかになった。

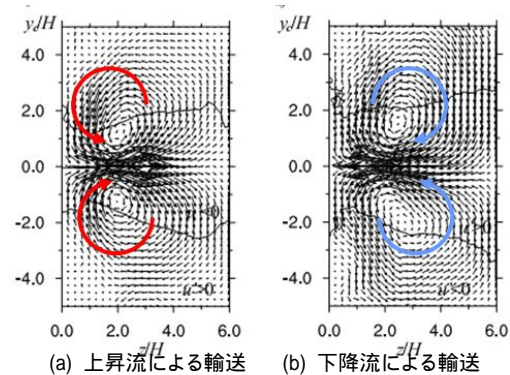


図 1 抽出された渦構造の例。上下方向に回転する二つの渦対が見られる。(z:鉛直方向, y_c :基準点からの主流直交方向, u :主流, H :粗度高さ)

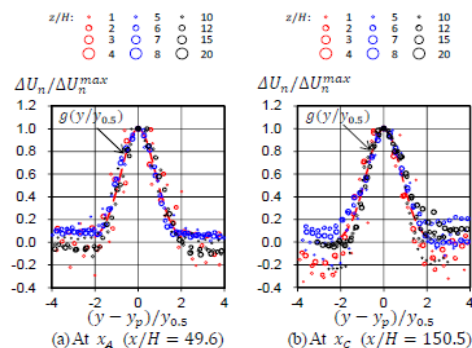


図 2 粗面境界層内外での後流の速度欠損特性 (縦軸:速度欠損量, 横軸:速度欠損中心からの主流直交方向, H :粗度高さ, z :床面からの距離。各プロットが、床面からの距離を示している。 g は二次元後流の普遍プロファイル。

(2) 乱流境界層内での大規模構造

数値解析により得られた乱流構造が、粗面乱流境界層内で維持される機構を分析するため、補足的に風洞実験を行った。風洞実験では、粗面乱流境界層の形成に加えて、スパイヤーと呼ばれる乱流生成装置を設置し、敢えて大きな速度欠損を形成した場合の運動量の拡散機構を分析した。その結果、境界層外における後流の速度欠損の広がり、すなわち運動量拡散は、従来から良く知られた自由せん断流中の二次元後流分布と良く一致する(図2(a))に対し、境界層が発達した下流行きでは(図2(b))分布からの隔たりが大きくなること示された。この具体的な運動量輸送メカニズムについては、さらに考察の余地が残されているが、粗面乱流境界層における乱流維持のメカニズムが、自由せん断流中と大きく異なることを明らかにした意義は大きい。

(3) 壁面風圧力と幾何形状の関係

粗面周辺気流場を LES により解析し、粗面により形成された非定常乱流気流場が壁面変動風圧に及ぼす影響を分析した。従来の換気回路網設計では、風洞実験などによる平均圧力分布から求めた平均壁面風圧係数を用いているが、本結果によれば変動風圧係数は平均風圧係数と同程度に寄与するため、変動気流場による換気量の考慮が不可欠であることが示された。それに加え、変動風圧に基づき条件分けすることにより、変動風圧に対する周辺気流を分析した。たとえば、図3(a)、(e)に示されるように、大きな壁面変動風圧が生じる際には、キャノピー内に強い下降流が発生すると同時に、粗面側面からも強い主流の流れ込みが確認された。これらにより、粗面壁面風圧が粗面周辺気流に密接に関係していることが示された。

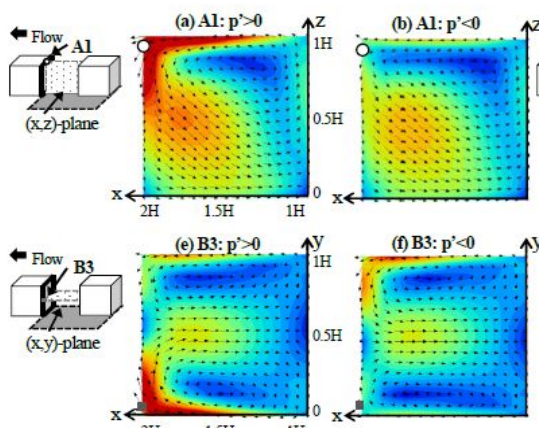


図3 p' (p' は変動壁面風圧)により条件付き平均した粗面周辺気流場。(a) $p' > 0$ における鉛直断面気流、(b) $p' < 0$ における鉛直断面気流、(e) $p' > 0$ における水平断面気流、(f) $p' < 0$ における水平断面気流

(4) 平均速度場と幾何形状の関係

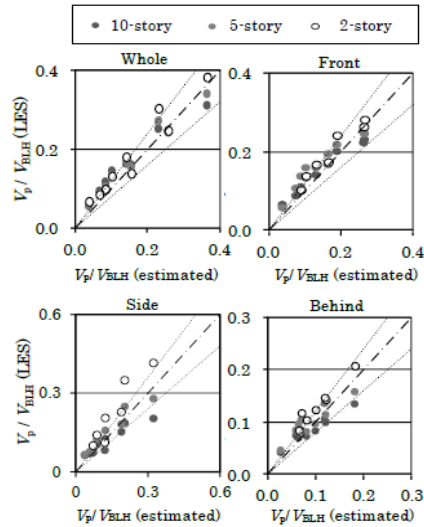


図4 粗面周辺の歩行者高さにおける速度の予測値(横軸)と数値解析による算出値(縦軸)の比較。whole: 歩行者高さ全域, front:粗面前方, side:粗面側面, behind:粗面後方。各プロットは、歩行者高さ推定の想定階

粗面周辺気流場を LES により解析し、歩行者高さ(高さ 1.5m)における速度場と粗面の幾何形状および観測位置との依存関係を明らかにした。また、対象粗面配列として粗面高さ、粗面の縦横比、敷地面積に対する粗面面積など、種々の粗面形状パラメータを組み合わせた複数条件での気流場解析を行った。得られた数値解析の結果に基づき、歩行者高さ速度の推定式を粗面の幾何パラメータによってモデル化した。その結果、図4に示す通り、歩行者高さ全域、粗面前方、後方、側面のそれぞれの観測位置に置いて、推定式が高い精度で歩行者高さ風速を予測できることを示した。これらのことは、歩行者空間における風環境評価のための実用的なモデル式の提案だけではなく、平均気流場に対して、いかなる粗面パラメータがどの程度作用するかを明らかにしており、極めて重要な成果が得られたといえる。

(5) 非定常速度場の幾何形状依存性

粗面周辺気流場を LES により解析し、粗面により形成された非定常乱流気流場について、歩行者高さにおける非定常風速の確率性

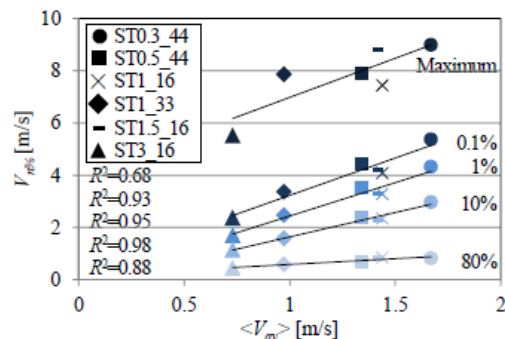


図5 歩行者高さにおける n%超過風速(縦軸)と平均風速(横軸)の関係

状の幾何形状依存性を分析した。粗度配列には、粗度高さ、粗度の縦横比、敷地面積に対する粗度面積など、種々の粗度形状パラメータを変化させることで、風速分布の幾何依存性の解明を試みた。種々の配列の非定常速度場から、風速の確率密度関数を算出した。確率密度関数の分布は、粗度形状による平均速度や乱れ強さの影響により大きく異なる物の、平均速度と標準偏差により定義した正規化確率変数を用いることで、平均値周りにおいて配列によらずほぼ同様の確率密度分布を得ることが示された。また、累積度数分布から、 $n\%$ 超過風速を定義し、平均速度との依存関係を分析することで、 0.1% 程度までの超過風速であれば、風速の確率密度分布がほぼ配列に依存しないことから、平均値により良く予測できる一方で、最大風速は粗度条件により大きく異なることが明らかになった(図5)。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

池田恭彰, 萩島理, 池谷直樹, 谷本潤, 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 709, 査読有, 2014, 259-267

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(697), 査読有, 2014, 297-304

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, 査読有, 2013, 56-65,

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), 査読有, 2013, 105-113

[学会発表](計18件)

池谷直樹, Nurizzatul Atikha Binti Rahmati, 萩島理, 谷本潤, 都市境界層内におけるスパイヤー後流と乱流境界層気流の干渉に関する基礎的検討, 日本流体力学会年会 2014, 2014.9.16, 東北大学

池谷直樹, 萩島理, 谷本潤, 都市境界層を模擬した粗面上の速度・湿度プロファイルの相似性に関する考察, 日本建築学会大会(近畿), 2014.9.12, 神戸大学

N. Ikegaya, A. Hagishima, J. Tanimoto, Investigation on flow distribution based on the quadrant analysis over urban-like roughness, The 6th International Symposium on Computational Wind Engineering, 2014.6.8, Hamburg, Germany

N. Ikegaya, Y. Ikeda, A. Hagishima, J. Tanimoto, Geometric Effects on Wind Environment in Simplified Urban Canopies, The 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems, 2014.4.15, Sendai, Japan

池谷直樹, 萩島理, 谷本潤, 都市キャノピー上空の乱流構造が運動量輸送に及ぼす影響の解明, 第27回数値流体力学シンポジウム CFD2013, 2013.12.17, 名古屋大学

池谷直樹, 萩島理, 谷本潤, 都市粗度群空気力学パラメータの同定方法に関する考察, 日本建築学会大会(北海道)学術講演会, 2013.8.30, 北海道大学

池谷直樹, 萩島理, 谷本潤, 都市大気境界層上空の対数領域における空気力学パラメータ同定方法の考察, 日本風工学会年次研究発表会, 2013.5.29, 東北大学

[その他]

ホームページ : <http://ktlabo.cm.kyushu-u.ac.jp/j/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

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