

LESによる都市大気境界層の 大規模乱流構造階層性に関する研究

A LES Study of Hierarchical Structure
Above Urban Canopy with Turbulence Organized Structure

章晋¹・Letzel Marcus²・稲垣厚至³・瀧本浩史⁴・神田学⁵

Jin ZHANG, Letzel MARCUS, Atsushi INAGAKI, Hiroshi TAKIMOTO and Manabu KANDA

¹学生会員 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8852 東京都目黒区大岡山2-12-1)

² Ph.D., Leibniz University of Hannover, Institute of Meteorology and Climatology (Hannover, Germany)

³正会員 博士(工学) 東京工業大学 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8852 東京都目黒区大岡山2-12-1)

⁴学生会員 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (同上)

⁵正会員 工学博士 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (同上)

In this study, a Large-Eddy Simulation model that is capable of resolving urban buildings and the whole atmospheric boundary layer was employed to investigate the turbulence organized structure at different height. Results are analyzed with a low-pass filter and conditionally averaging methods.

The visualization of fluctuating velocity reveals the hierarchical structure with turbulence organized structure. The conditionally averaging results of fluctuating velocity large scale and small scale have great resemblance. The width of large scale structure is 6 times of the small scale structure. And groups of x-direction vorticities are found gathering in large scale low speed region. Both mean the existence of the hierarchical and cluster structures in the urban atmospheric boundary layer.

Key Words : TOS, atmospheric boundary layer, urban meteorology, hierarchical structure, LES, cluster structure

1. 序論

近年, 平板上壁乱流の大規模構造が数多くの風洞実験と数値実験で明らかにされつつある (Jimenez¹⁾). この大規模乱流構造は壁乱流が持つ特徴的なもので, 運動量輸送に支配的な役割を果たしている指摘されている (Finnigan²⁾). 平板境界層とは性質が大きく異なる都市においても, キャノピーに近い対数域では, 乱流組織構造の存在が観測され, 接地境界層の熱や運動量輸送に深く関わっていることがわかってきた (稲垣ら³⁾).

このような大規模乱流構造は地表面に限らず, 大気境界層上部にある対流層からも影響を受けている可能性が指摘されている (Inagaki ら⁴⁾). よって, 都市における大規模乱流構造の全貌を解明するためには, 都市の地表面から, 都市上空にある対流層全体を同時に考慮する必要がある. しかし, 都市表面幾何形状の多様性, 人工排熱など人間活動に絡む不確実性, また観測データの取得の難しさから, 都市における乱流構造の全体図に関し

ては, まだ未解明なところが多い. 丸山ら⁵⁾による屋外模型都市での観測では, 都市域の地表面近傍の大規模乱流組織構造に関する知見が得られたが, その組織構造が大気境界層とどの様に影響を及ぼし合っているのかはまだ解明されていない. 一方 Kanda ら⁶⁾は建物を解像し, かつその近傍 (対数域) に存在する乱流組織構造について解析したが, 解析領域が接地層に限られており, 対流境界層からの影響を考慮していない.

これに対して著者らはドイツの研究グループと共同開発した数値解析ツール (超並列LES) と東工大の超並列グリッドコンピュータ (TSUBAME) を利用することにより, 都市構造物の解像と大気境界層全体の再現をはじめ同時に実現させた. これにより, 章ら⁷⁾ では都市大気境界層における乱流統計量の相似則の適用性についての検討を行った. 本研究では, その結果を踏まえ, さらに計算領域を広げて, 都市大気境界層の乱流組織構造に着目する. そして, スケール分離と条件平均の手法により, 壁近傍および外層の大規模乱流組織構造の特徴について考察することを目的とする.

2. 数値実験概要

表-1に本研究の計算条件をまとめた。流れ方向x, 横方向y, 鉛直方向zにそれぞれ64h, 64h, 64h (h:建物高さ)の計算領域を取った。地表面には都市建物を代表する高さ40mの立方体を, 建蔽率0.25で正方配置した。x・y方向の壁面はともに周期境界条件で, z方向の上部壁面はslip条件, 下部壁面と建物立方体の表面は対数則に基づく壁関数を利用したnon-slip条件とした。

表-1 計算条件概要

計算領域	2.56km×2.56km×2.6km
格子間隔	5m×5m×5m
初期主流風速	20m/s
初期温位プロファイル	0~800m:0.08K/m ;800~:0.74K/m
境界条件 (x・y方向)	周期境界
境界条件 (上部壁面)	Slip
境界条件 (下部壁面)	Non-slip
計算時間	10800s (3 hours)

実際の気象境界層を再現するために, 初期条件として, 地表面温位を300K, 初期境界層高さを800mに設定し, 800mまでの温位勾配は0.08K/m, それ以上では, 0.74K/mの勾配となっている。また, 上部壁面からの熱対流への反射と擾乱を防ぐため, 高さ2000mから, 減衰関数を利用し, Rayleigh-Damping層を設定した。接地層における気象状態が中立になるように, 20m/sの地衡風と0.07K・m/sの熱を与え続けた。本研究では, 3時間後で得られる流れ場の瞬間値を解析対象とする。

3. 解析方法

稲垣ら³⁾は屋外模型都市の実験で都市に見立てた構造物群の上空に現れる乱流組織構造がストリーク構造をしており, 運動量輸送の大部分を担っていることを示した。本実験では数値計算から得られた三次元データを基に, ある瞬間の水平断面平均した主流風速Uからのずれ u' を水平断面のコンター図に表すことで低速ストリークを可視化する。

また, Adrianら⁸⁾は平板境界層での風洞実験により, 大規模低速領域の周辺で渦構造がクラスター化することを報告している。さらに, これらのクラスター化された渦構造と大規模低速領域は, 階層構造を形成していると指摘している。同じ現象は直接数値シミュレーション(DNS)による平板の数値実験でも観察されている(岩本⁹⁾)。大気境界層ではレイノルズ数が高く, 様々なスケールの渦が混在しているため, 階層構造とクラスター化している組織構造の特徴を考察するには, 渦のスケール分

離が必要である。丸山ら⁵⁾は乱流組織構造を内部スケール(小スケール)と外部スケール(大スケール)に分離する方法を提案している。これによると, 小スケールの渦と大スケールの渦の中間的なスケールを持つ水平領域を考え, この領域の空間平均を定義することで, ある観測点の瞬間風速を次のような平均成分と変動成分に分解することが出来る。

$$u' = [u'] + u'' \quad (1)$$

ここで[]は中間領域における空間平均, u'' はその変動成分を表す。もし, この中間領域の空間平均が小スケールの渦より十分大きければ, 小スケールの渦は u'' に含まれることになる。よって, この中間領域の平均値がフィルターとなって小スケールの渦と大スケールの渦の分離ができる。

本実験では, 中間領域を一辺が2h(80m)の正方形空間と定義する。Cocealら¹⁰⁾による水平領域16h×12hの数値解析の研究では, キャノピー近傍において建物から直接生成される横渦は2hの幅を持つという結果が出た。建物から生成する小スケール渦構造を除去するため, その結果を参考に, フィルター幅を2hとした。よってフィルターで移動平均をかけた後の流れ場は地表面建物からの直接的な影響を受けていないと考えられる。

また, 大・小スケール乱流構造を定性・定量的に捉えるため, $[u']$ と u'' に対して条件平均を施した(例えば, Tomkinsら¹¹⁾, Inagakiら¹²⁾)。その手順は以下に示す。

- 1) 抽出条件を満たした格子点を特定し, その格子点を中心とする, ある領域内の流れの空間情報を抽出する。
- 2) 抽出された空間情報を中心格子点が一致するように足し合わせ, アンサンブル平均を求める。

抽出条件としては, u'' (大スケールでは $[u']$)が負であり, かつ, その値が $|u''|$ (大スケールでは $|[u']|$)の水平断面平均値の75%以上と設定した。

抽出範囲は, 小スケールに5h×2.5h, 大スケールに32h×16hとした。

4. 結果と考察

(1) 乱流統計量

本実験の有効性を検討するため, 計算から得られた乱流統計量の確認を行う。接地境界層における中立時の抵抗係数は地表面形状によらず式(2)に従う。(Raupach¹³⁾)

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z-d}{z_0} \quad (2)$$

ここで u は主流空間平均風速, κ はカルマン定数0.4で, z_0 と d はそれぞれ粗度長とゼロ面変位で, 式(2)に当てはまるような最適値から推定した。その結果 $z_0=1.4m$, $d=33m$ となった。 d/h は0.825で, Chengら¹⁴⁾の結果とほぼ一致している。図-1(c)の点線はこの式を表している。

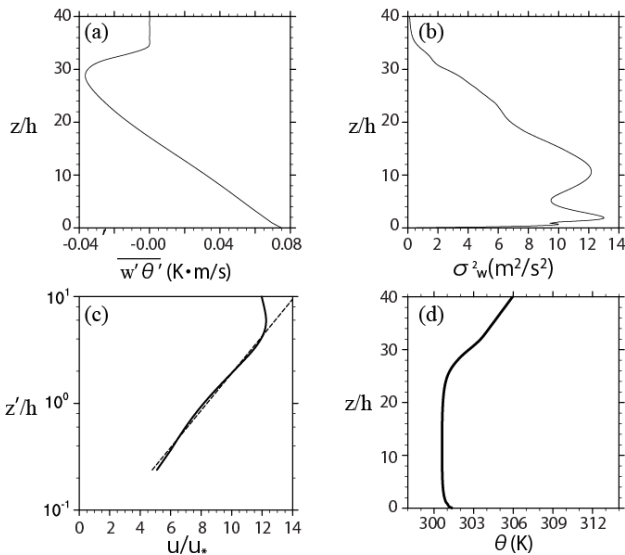


図-1 各種乱流統計量

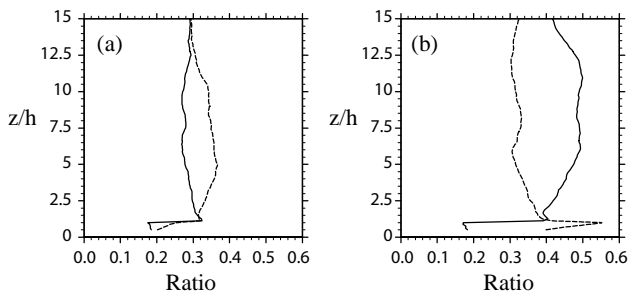


図-2 (a) Q2, Q4の発生率, (b) 運動量輸送への貢献度
点線: Q4イベント, 実線: Q2イベント

実線は実験で得られた結果で、およそ3hまで、風速分布が対数則に合っていることが分かる。また、以下の式を用いて、安定度指標を求めた。

$$\frac{z'}{L} = -\frac{(g/T)(\overline{w'T'})}{u_*^3/kz'} \quad (3)$$

ここで、 $z' = z - d$ とし、 d は式(2)から得られたゼロ面変位である。高度が上がるにつれ、不安定になるが、 $z'=2h$ の高さでは z'/L は-0.038であり、接地層においては中立であるといえる。

(2) 混合層の再現

図-1の(a), (b), (d)にそれぞれ40h(1600m)までの顕熱フラックス輸送、鉛直風速分散と温位プロファイルを示す。大気境界層を再現する場合、境界層上端からの連行による影響に注意を払わなければならない。それは、境界層高さが低い場合に、エントレイメントによる上空からの負の顕熱フラックス輸送の影響が直接接地層に及びかねないからである。今回の計算では、エントレイメント層からの負の顕熱フラックス輸送は18hぐらいまでとなっており、混合層の発達に十分な空間を確保できたと判断できる。図-1(b)の鉛直風速分散の鉛直プロファイルでは、接地層2hと10hあたりの高さで分散のピーク

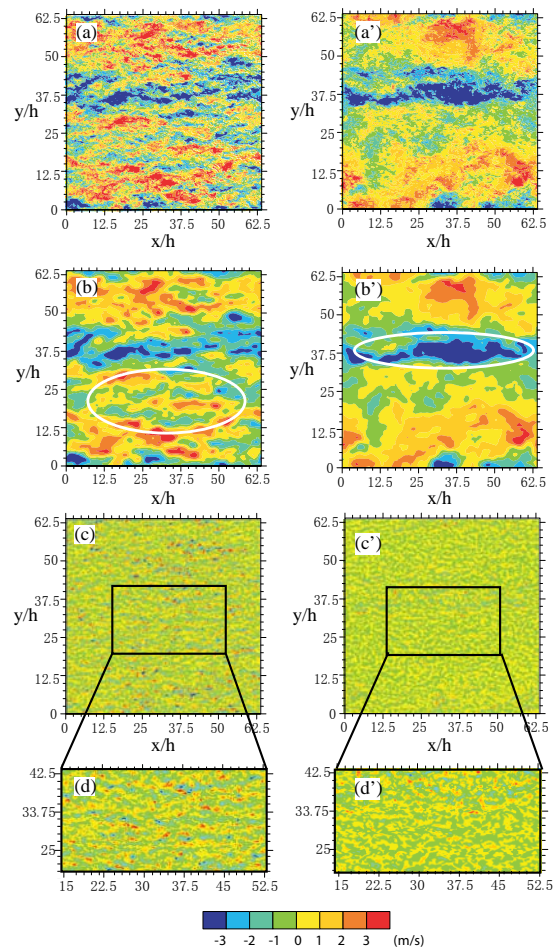


図-3 (a), (b), (c): 2hにおける u' , $[u]$, u'' の分布
(a'), (b'), (c'): 7hにおける u' , $[u]$, u'' の分布

が出ている。10hでのピークは対流が一番強いところを表しているのに対し、2hでのピークはシア、もしくは、建物による局所渦から生じたものであると考えられる。以上の結果から混合層の再現がうまく行われていると判断できる。

(3) 四象限解析

四象限解析は、低速で上向きの流れであるQ2(ejection)と高速で下向きの流れであるQ4(sweep)の相対的な発生頻度を調べ、それらの運動量輸送への貢献度を示す乱流構造の重要な指標の一つである。図-2の(a), (b)はそれらの鉛直分布を表している。キャノピー層から離れるほど、Q4の発生頻度が大きいが、Q2が総エネルギー輸送に占める割合が高くなる。しかし、キャノピー層になると、その傾向が逆になり、Q4が運動量輸送を多く占めるようになる。この結果はRaupach¹³⁾とMoriwakiら¹⁵⁾の結果と一致している。その原因について様々な考察がなされているが、Raupach¹³⁾の仮説によると、キャノピー近傍の風速プロファイルの変曲点における不安定で縦渦が生じ、その縦渦がキャノピー層の強いsweep現象に寄与しているとしている。

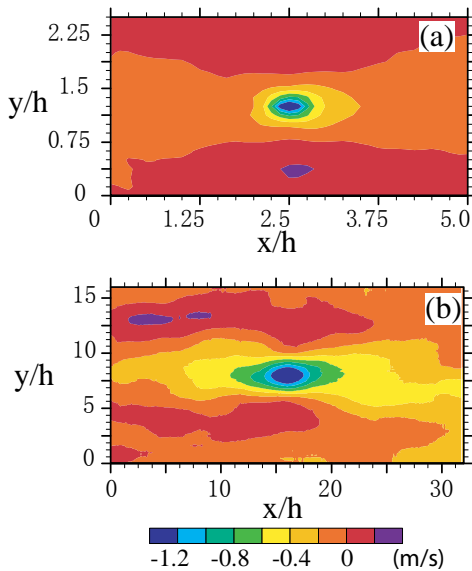


図-4 2hにおける大・小スケールの流速変動
(a):小スケール; (b):大スケール

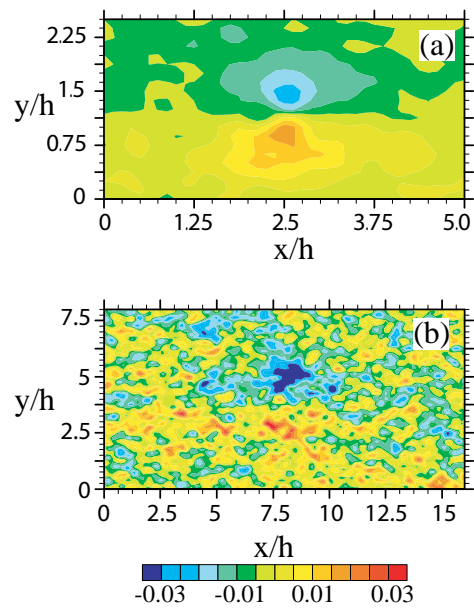


図-5 2hにおける大・小スケールのx方向渦度分布
(a):小スケール; (b):大スケール

(4) 水平断面における乱流構造

流れの可視化は乱流構造を検討する重要なツールである。ここでは接地層内にある高さ2hと対流層に近い7hでのスケール分離の結果と条件つき抽出される構造の階層性について考察する。

a) 大小スケールの分離

図-3は2hと7hにおける流速変動成分 u' とそこから分離した大・小スケール流速変動成分 $[u']$, u'' の分布を表している。(a)と(a')に注目すると、主流方向に低速ストリーク構造が発達していることが分かる。高度2hでは、幅2hの小スケール低速ストリークと幅5, 6hの大スケールの低速ストリーク構造が混在している。7hでは、小スケール構造の割合が減り、大スケール構造が支配的になる。このような低速ストリーク構造は平板や都市などの観測および数値シミュレーション実験でも見られる。(例えば、丸山⁹⁾, Kandaら⁹⁾)

図-3の(a), (a')のデータをもとに、式(1)を適用し、それぞれの高さにおける大スケール変動(b), (b')と小スケール変動(c), (c')が得られた。(b)の高さ2hにおける大スケール変動では、幅5, 6hのストリーク構造がスパン方向に交互に並んでいることが見られる。一方、(b')の高さ7hでは、2hで見られたストリーク構造が見られなくなり、白い枠で示された幅のより広いストリーク構造になっている。

高さ2hでの小スケール変動 u'' を表す(c)では、幅hぐらいのストリーク構造がスパン方向に交互に並んでいる。7hになると、その強さが弱まり、ストリーク構造もはっきり現れていない。

b) 高さ2hにおける条件付き抽出

大・小スケール変動の相似性を定性的に見るため、 $[u']$ と u'' に対して、条件付き抽出を行った。ここでは、大・小スケールの流速変動とx方向の渦度を抽出し、平

均的な乱流構造をみる。

図-4ではそれぞれ高さ2hにおける大・小スケールの流速変動 $[u']$ と u'' の抽出結果をコンター図とベクターで合わせて表している。(a)から、小スケールは条件平均の中心で変動が最も大きく、流れ方向に伸びる幅hの低速ストリーク構造を持っていることが分かる。低速ストリークの両側に反対方向の渦がストリークの中心に向けて巻いているのが確認できる。この渦対が2hの幅を持ち、平板で生じる小スケール渦より遥かに大きく(Adrian⁸⁾、建物による影響を受けていると考えられる。屋外都市模型においても条件抽出により、低速領域周りの同様の渦構造が確認されている(Inagakiら¹²⁾)。

(b)の大スケールの $[u']$ では小スケールと同じく、流れ方向に細長い低速ストリーク構造を有している。その幅はおおよそ6hで、ストリークの変動強さが小スケールのより強いが、中心部の強い低速領域が小スケールのものと近いアスペクト比で、楕円形の形を有している。

図-5では、2hにおける大・小スケールのx方向渦度の条件平均の結果が示されている。(a)の小スケールでは反対方向のx方向渦度が低速領域の中心を境に、流れ方向に均等に分布しているのが分かる。(b)の大スケールの渦度では小スケールと同じく、反対方向のx方向渦度の塊が低速領域の両側に分布している。

以上の結果から、高度2hで、大小スケールの乱流が相似な構造を有し、階層性を持っている可能性があると考えられる。

c) 高さ7hにおける条件付き抽出

高度2hで見られる乱流構造の階層性が大気境界層のどこまで影響を及ぼしているのを見るため、同じ条件付き抽出の手法を7hでの結果にも適用してみた。図-6、図-7はその流速変動とx方向渦度の結果である。

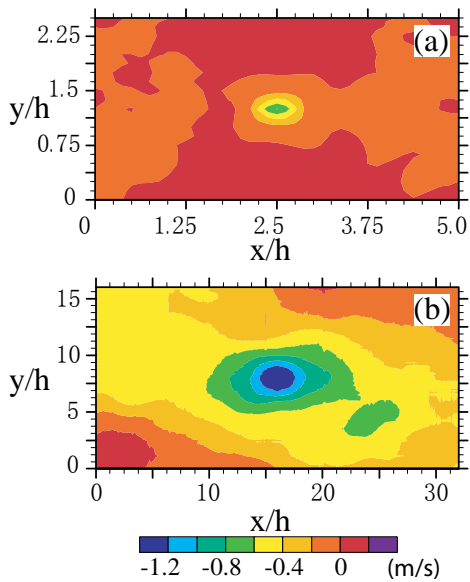


図-6 7hにおける大・小スケールの流速変動
(a):小スケール; (b):大スケール

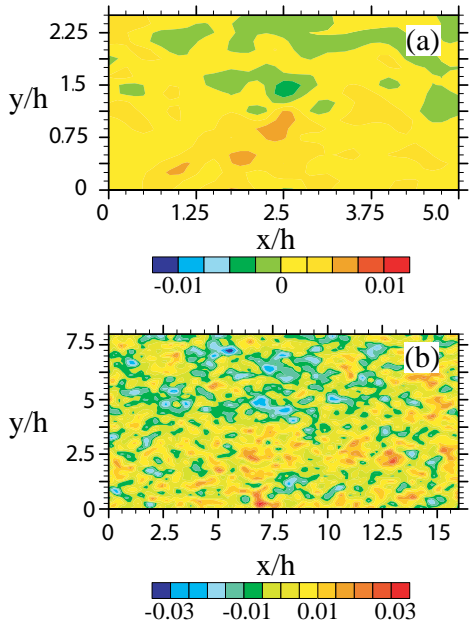


図-7 7hにおける大・小スケールのx方向渦度分布
(a):小スケール; (b):大スケール

図-6の(a)から、2hで見られる小スケール低速ストリーク構造が相当弱くなるのがわかる。一方、幅2hの渦対が依然低速領域の周りに存在しており、建物の影響がそこまでも及んでいるのが興味深い。

一方大スケールの(b)では、低速領域の幅が2hと比べ、広くなるのがわかる。その中心領域の強さも2hより強い。しかし、その外縁の低速領域が斜めになっており、渦対も見られなくなる。

図-7の7hにおけるx方向渦度では、渦度の強さが図-5の2hより弱くなるが、反対方向のx方向渦度が流れ方向に沿って低速の中心領域を境に分布している。大スケール

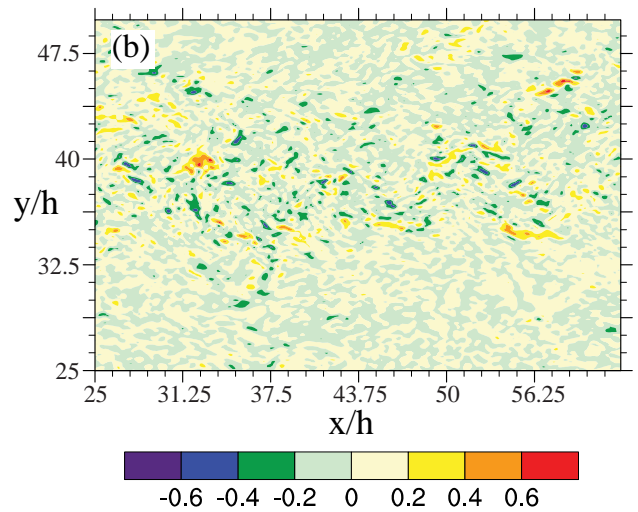
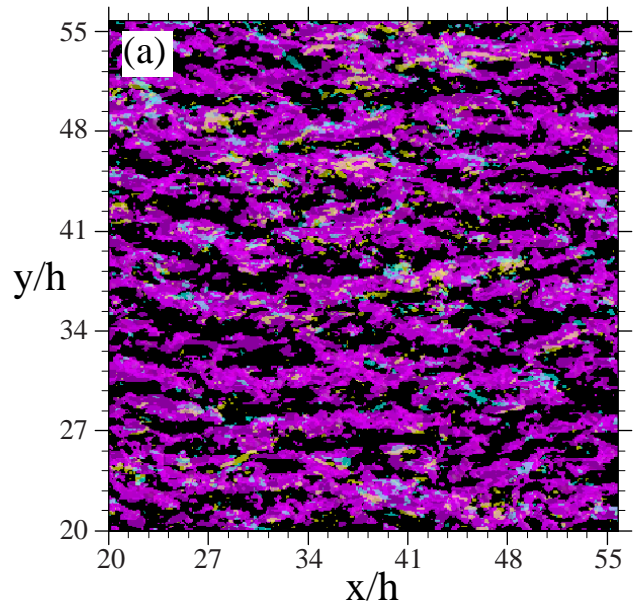


図-8 (a):渦度と-1m/sの低速領域(ピンク色)の等値面
(b):7hにおけるx方向の渦度分布

ルストリーク構造のサンプル数が少ないためか、今回の実験ではその高さでの乱流構造の階層性の有無が判断できない。

d) 乱流構造のクラスター化

岩本ら⁹⁾は平板乱流のDNSで渦構造のクラスター化を報告した。その現象を都市の大気境界層で確かめるため、2hと7hで渦構造を代表する縦渦を可視化した。

図-8(a)は高さhから3hの間の縦渦および小スケールの速度変動成分 u'' の等値面を示したものである。縦渦の等値面の値はそれぞれ $-0.45s^{-1}$ 、 $0.45s^{-1}$ とした。この図より低速ストリークとクラスター化した縦渦の位置が高い相関を持っていることが分かる。(b)の7hでは、強いx方向渦度の渦対が主に大スケールの低速領域(図-3(b'))に分布している。強い縦渦対の分布がうねりを持っており、その形が図-3(b')の低速ストリークの形と似ていることが分かる。

以上の結果から、都市の大気境界層の乱流構造も、クラスター性を有しており、乱流構造と縦渦の相関を定性的に証明した。

5. 結論

大規模並列計算を用いて都市構造物を解像した大気境界層のLESを実施し、異なる高さ(2h, 7h)における大規模乱流構造の特徴について、スケール分離と条件平均の手法を通じて以下の結果を得た。

- 1) 平板乱流で見つかる大規模乱流の階層構造が都市における大気境界層にも存在する。キャノピー近傍では、大スケールの低速ストリーク構造の幅が小スケールの5, 6倍程度となっている。
- 2) キャノピー上空では、Q2(ejection)イベントがQ4(sweep)イベントよりも発生頻度が少ないにも関わらず、より多くの運動量輸送に寄与している。その傾向は対流層上部まで見られ、地表面の強いシアの影響がかなり上空まで及んでいることが分かる。
- 3) 7hでは、小スケールの低速ストリーク構造が依然存在するが、その強さは2hのものより弱くなる。一方、大スケールの低速ストリーク構造は2hより強くなり、幅も広がる。
- 4) 2h, 7hともに、低速ストリークが存在する箇所に、それ以外の場所より強い縦渦のペアが多く見られる。都市における大気境界層においても渦構造のクラスター化が確認された。

参考文献

- 1) Jimenez, J.: Turbulence flows over rough walls, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.36, pp.173-196, 2004.
- 2) Finnigan, J.J.: Turbulence in plant canopies, *Ann.Rev.Fluid Mech.*, Vol 32, 519-572.
- 3) 稲垣厚至, 神田学, 森脇亮: 屋外都市スケールモデル実験で観測された乱流構造に関する考察, 土木学会水工学論文集, 50, 445-450, 2006.

- 4) Inagaki, A. and Kanda, M.: Turbulent flow similarity over an outdoor reduced urban model, *Journal of Fluid Mechanics*, 615, 101-120, 2008.
- 5) 丸山綾子, 稲垣厚至, 神田学: 大気接地境界層乱流における内部・外部スケールの乱流構造特性, 土木学会水工学論文集, 52, 253-258, 2007.
- 6) Kanda, M., Kasamatsu, F. and Moriwaki, R.: Spatial variability of turbulent fluxes and temperature profile in an urban roughness layer, *Boundary-Layer Meteorology*, 121, 339-350, 2006.
- 7) 章晋, 稲垣厚至, 神田学: 建物を解像したLESによる大気境界層の乱流相似則に関する研究, 土木学会水工学論文集, 52, 313-318, 2008.
- 8) Adrian, R. J., Meinhardt, C.D. and Tomkins, C.D.: Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, 422, 1-54, 2000.
- 9) 岩本薫, 笠木伸英, 鈴木雄二: チャンネル乱流における階層構造, 日本流体力学会年会, AM05-02-003, 2005.
- 10) Coceal, O., Dobre, A., Thomas, T.G.: Structure of turbulent flow over regular arrays of cubical roughness, *J. Fluid Mech*, 589, 375-409, 2007.
- 11) Tomkins, C.J. and Adrian, R.: Spanwise structure and scale growth in turbulent boundary layers, *J. Fluid Mech*, 490, 37-74, 2003.
- 12) Inagaki, A. and Kanda, M.: Structure of active turbulence over an array of cubes within the logarithmic layer of atmospheric flow, *J. Fluid Mech*, (submitted).
- 13) Raupach, M.R., Antonia, R.A. and Rajagopalan, S.: Rough-wall turbulent boundary layer, *Appl. Mech. Rev.* 44, 1-25, 1991.
- 14) Cheng, H. and Castro, I.P.: Near wall flow over urban-like roughness, *Boundary-Layer Met*, 104, 229-259, 2002.
- 15) Moriwaki, R. and Kanda, M.: Flux-gradient profiles for momentum and heat over an urban surface, *Theoretical and Applied Climatology*, 84, 127-136, 2006.

(2008. 9. 30受付)