

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

THE CHARACTERISTICS OF INNER- AND OUTER-SCALE FLUCTUATIONS
WITHIN THE ATMOSPHERIC SURFACE LAYER

丸山綾子¹・稲垣厚至¹・神田学²

Ayako MARUYAMA, Atsushi INAGAKI and Manabu KANDA

¹学生員 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8852 目黒区大岡山2-12-1 14-9)

²正会員 工博 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (同上)

The present study investigated the relationship between the mean and instantaneous characteristics of turbulence within the atmospheric surface layer over urban like roughness. To make it, we compared the horizontal distribution of the turbulent fluctuations and the turbulent statistics, which are derived from the same data obtained in the facility of comprehensive outdoor scale model for urban climate (COSMO).

It is known that the turbulent motion within the atmospheric surface layer is composed of active and inactive eddies. The active eddy is originated from the surface under neutral stratification and relevant to the turbulent transport process. The inactive eddy is attributed the mixing in the atmospheric boundary layer and irrelevant to the turbulent transport process. To evaluate the characteristics of active turbulence which reflects the characteristics of roughness, we decomposed the turbulent fluctuation into the active and inactive components. This analysis revealed that the streaky structure observed in COSMO is attributed to the active turbulence.

Key Words : outdoor urban scale model, active and inactive eddies, inner scaling similarity coherent structure of turbulence, spectral analysis

1. はじめに

都市は強い気象的インパクトを持ち、深刻な都市大気環境問題を引き起こす要因となっている。この状況に際し、都市起源の各種スカラーや運動量輸送を決定する都市大気乱流構造を把握することが重要である。特に、建物凹凸の形状抵抗や摩擦が主な駆動力となって発達する都市接地境界層は、都市近傍と大気境界層間の乱流過程を繋ぐ重要な役割を果たすため、その本質的理解が必要不可欠である。

既往の都市接地境界層における研究は、主に内部スケールの相似性に基づいた乱流変動の時間平均特性に関して検討されてきた。中立大気安定度下において、内部スケールとは地表面の凹凸や摩擦で作られた渦を規定する物理スケールで、地表面抵抗を表す摩擦速度や地表面からの距離（高度）等で表現される。都市間あるいは平原観測との比較から、運動量や鉛直風速変動成分に関しては地表面や混合層の条件によらず内部スケールの相似性が成り立つことが指摘されている（Roth¹⁾）。一方、水平風速変動成分は相似性が乏しいことが知られており（Kaimal et al.²⁾）、これは大気境界層全体の乱流混合に起因した接地境界層外部スケールの低周波変動の影響であることが指摘されている（Panofsky et al.³⁾）。このように接地境界層内では、運動量輸送に

関連する内部スケールのactiveな成分と運動量輸送に関与しない外部スケールのinactiveな成分が混在している。

ところで、間欠的な乱流輸送の特性を知るためには時間平均特性の把握だけでは不十分であることから、乱流の瞬間構造特性に着目した研究が行われている。例えば、主な乱流輸送を担う構造について、実都市では鉛直分布形状が観測されている（Moriwaki and Kanda⁴⁾）。また、屋外都市模型ではその水平分布形状が観測されている（稲垣ら⁵⁾）。しかしながら、これまで研究されてきた時間平均特性と瞬間構造特性の相互関係については明らかにされていない。

そこで、両者を比較することでこれらの関係を明らかにし、比較的研究事例の多い時間平均特性に関する知見を瞬間乱流構造研究に反映させることを考える。本研究では、時間平均特性で見られた内部・外部スケールの概念が、瞬間構造にどのように反映されているのか検討した。その際、内部スケールと外部スケールを分離し、地表面特性に対応したactiveな内部スケールの乱流構造の把握を試みた。

研究手法としては、屋外都市模型（COSMO, comprehensive outdoor scale model experiment for urban climate）における乱流計測を行った。COSMOの特徴は、建物の形状や配列が一樣な点、屋外で観

測ができる点、乱流構造の水平分布が観測できる点が挙げられる。このような理想的な条件下で得られた乱流構造の水平分布形状と乱流統計量の直接比較を行うことで、地表面凹凸に起因した乱流変動について検討することが出来る。

2. 内部スケールと外部スケール乱流変動の分離方法の提案

(1) 乱流変動の分離における仮定と方法

生波形から乱流変動成分を抽出する方法として、一般的には時間平均操作が行われる。

$$u = \bar{u} + u' \quad (1)$$

ここで、 u は生波形、 u' は平均値からの変動成分、 \bar{u} は時間平均を意味する。生波形がinactiveな乱流変動とactiveな乱流変動を含んでいる場合、式(1)の変動成分 u' に両者の影響が含まれる。

そこで両者を分離するような新たな乱流変動成分の定義を提案する。本論においてinactiveな変動とは外層変動に起因した低周波変動を指し、inactiveな変動とactiveな変動は互いに独立で十分なスケール分離が出来ているとする(McNaughton⁶⁾)。

ここで、内部・外部変動の空間スケールに対して中間的なスケールを持つ水平領域を考える。この領域内の空間平均を定義することで生波形を次のような平均成分と変動成分に分解することができる。

$$u = [u] + u'_s \quad (2)$$

ここで、 $[u]$ はこの中間領域における空間平均、 u'_s はその変動成分をあらわす。もしこの中間領域の空間スケールが内部変動のスケールに比べて十分大きいとすると、内部スケールの乱流変動は式(2)の変動成分 u'_s に含まれることになる。また、領域の空間スケールが外部変動のスケールより十分小さい時、外部変動は式(2)の空間平均成分 $[u]$ に含まれることになる。つまりこの中間スケールでの空間平均操作は一種のハイパスフィルターの役割を果たしており、これによってactiveな乱流変動成分のみ抽出できると考える。McNaughton⁶⁾も同様の根拠に基づいて、小区間の時間平均によりinactiveな乱流変動の除去を試みている。

(2) COSMOへの適用

接地境界層において、外部スケールの渦は境界層高度 z_i で決定され、約1000mの空間スケールを持つのにに対し、COSMOにおける内部スケールの渦は建物の高さや観測高度で決定されるので数m程度と考えられる。つまり両者の中間における空間スケールは約100mとなり、この程度の領域での空間平均が妥当と考えられる。

ところで面的な乱流データを観測で得るのは難しい。そこで本研究では測器を水平一列方向(y 方向)に並べ、これに対し風が垂直に吹くときに得られる時間-空間(ty 面)データを、Taylorの凍結仮説を用いて水平断面(xy 面)データに置き換え、空間平均を行った。その際 y 方向の場の不均一性を考慮するため、式(2)の u'_s から時間平均分を差し引いた。最終的に次式よりactive成分を抽出した。

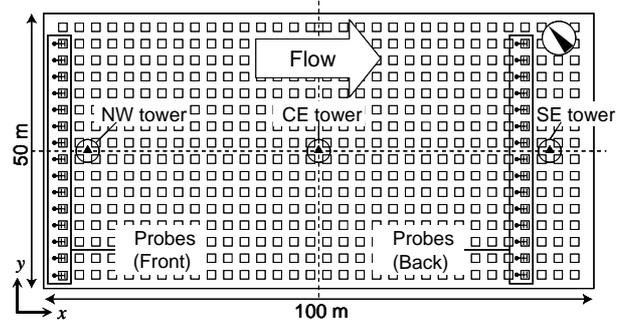


図-1 屋外模型都市



図-2 超音波風速計

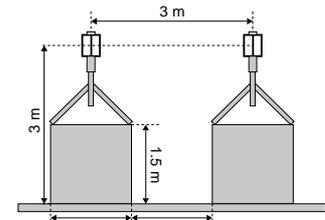


図-3 測器配置図

$$u = [u] + \bar{u}'_s + u''_s \quad (3)$$

ここで u''_s はactiveな乱流変動成分を表す。

中間領域の時空間スケールとして、本研究では水平50m、時間1secと設定した。これは上記の大きな見積りに基づいているのみで理論的根拠はない。そこで解析結果から帰納的にその有効性を検証する。具体的には、式(1)と(3)を用いて解析した際に運動量が変化しなければinactiveな低周波成分のみ除かれたと考える。

以下、式(1)で定義された乱流変動成分を低周波非除去時としてTD(temporal deviation)とし、式(3)によって定義された乱流変動成分を低周波除去時としてSD(spatial deviation)と示す。

3. 観測概要

(1) 実験施設

埼玉県の日本工業大学敷地内に作成した屋外模型都市COSMO(図-1)において、超音波温度風速計(図-2)を用いた乱流観測を行った。観測サイトについては図-1に示すような100×50 mのコンクリート平板上に、都市構造物を見立てた一辺1.5 m (=H)の立方体コンクリートブロックを建蔽率0.25となるよう整列配置した(16×32個)。このサイトでは冬季は北西の風、夏季は南東の風が卓越する。

(2) 観測機器

水平分布の測定には、超音波風速計Young Model 81000を30台用いて風速三成分(u, v, w)と温度(T)の同期計測を行った。超音波風速計の配置は、図-1, 3に示すように主流方向に対して上流側(front)に15台、下流側(back)に15台をコンクリートブロックの2倍の高(3m)の位置に設置し観測を行った。これにより、風が測器の並びに対して垂直に吹く時、Taylorの凍結仮説を適用することによって乱流変動の水平分布が観測される。また、上流側の観測値と下流側の観測値を比較することに

よって、COSMOが作り出す乱流構造を把握することが出来る．サンプリング周波数は10Hzである．

4．解析概要

(1) 解析手法

本研究では空間乱流構造と時間平均特性の直接比較のため、同じ時刻のデータを用いて解析を行った．統計量及び瞬間構造算出のための平均時間は、十分安定した大気乱流統計値を得るため30分とした（stull⁷）．その際、内部スケールと外部スケールの乱流変動の分離には先に述べた手法を用いた．この分離手法の妥当性を検討するため、低周波成分除去時、非除去時のスペクトルと乱流構造を比較した．風速データには風速計の傾きを補正するために傾度補正を施した．スペクトルはFFT（Fast Fourier Transform）を用いて算出した．

(2) 解析データの選別条件

全観測期間（2006年11月9日～2006年1月29日）に観測されたデータから以下の条件を満たすものを選別した．

水平分布の観測では、風向が測器の並びに対して垂直に吹く必要がある．そこで、平均風向が測器の並びに対し±10度の風向偏差に収まるデータを選別した．また本研究では、以下の式で定義される安定度指標が、-0.05から0.05までの時を中立とし、中立時のデータのみを解析した．

$$\frac{z'}{L} = -\frac{(g/T)(w'T')}{u_*^3/kz'} \quad (4)$$

ここで $z' = z - d$ とし、 z は実際の測定高度 (m)、 d はゼロ面変位である．ゼロ面変位はMacDonald⁸⁾の式を用いて算出し、その結果 $d = 0.46H$ ($H=1.5m$) であった． L はオブコフ長さ (m)、 g は重力加速度 (ms^{-2})、 $w'T'$ は顕熱フラックス (Kms^{-1})、 u_* は摩擦速度 (ms^{-1})、 k はカルマン定数 ($=0.4$) である．また、風速が $1.0(ms^{-1})$ 以上で、雨天時以外のデータを用いた．以上の条件を満たすデータは、全16データであった．

5．低周波成分の乱流変動除去手法の妥当性

(1) スペクトル

2006年11月12日の15:00～15:30までの水平風速 u 、鉛直風速 w のスペクトルと運動量 uw のコスペクトルを外部スケールの低周波成分非除去時 (TD) と除去時 (SD) で比較したものを図-4に示す．これらの図は上下流の各測器列15台で平均したもので、F (front)、B (back) は上流測器列15台の平均、下流測器列15台の平均の結果を示している．この期間の平均風速は約 $4(ms^{-1})$ 、風向はCOSMOの長軸方向に対して時計周りに2度傾いており、安定度指標は-0.021であった．この図より上流側と下流側の低周波除去前後を比較すると、非除去時の u スペクトルはピークが低周波側に現れており、低周波除去時

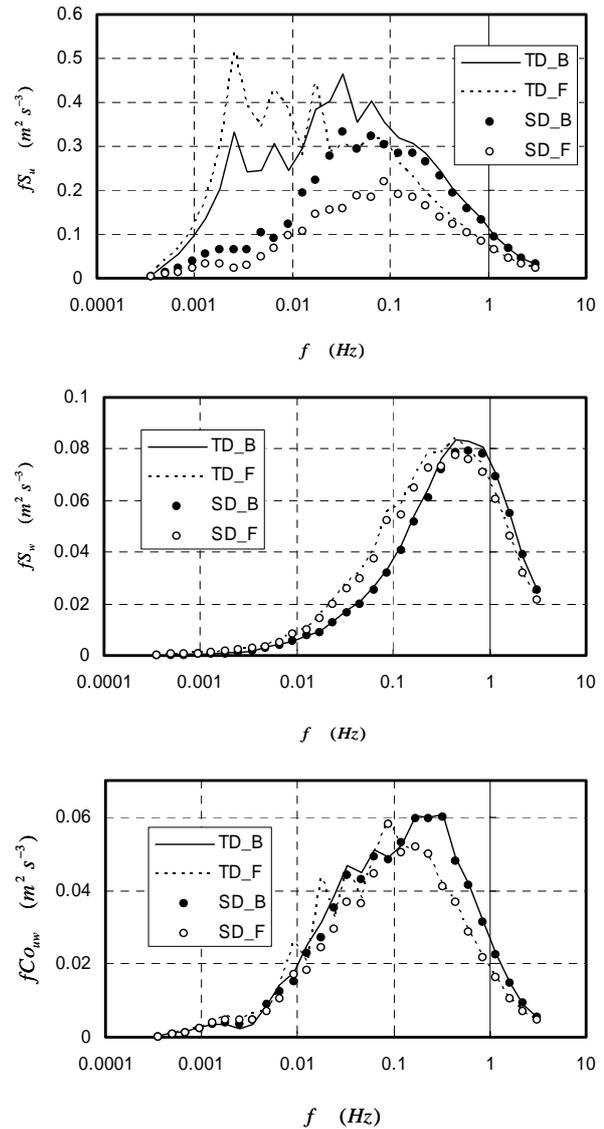


図-4 各種スペクトル・コスペクトル
TD: 低周波非除去時, SD: 低周波除去時
B: back, F: front

(SD) では、低周波側のピークが上下流共に大幅に減少していることが分かる．一方、 w スペクトルと uw コスペクトルについては、低周波除去前後でほとんど変化がない．つまり、本手法を用いることによって、正味の運動量輸送に関与しない、主に水平風速 u に含まれる外部スケールのinactiveな低周波成分が除けたと考えられる．

(2) 摩擦速度 u_* と速度変動の標準偏差 σ との関係

各風速成分の標準偏差 σ は内部スケール変動成分と外部スケールの変動成分から成り立つという前提から、摩擦速度 u_* と各風速成分の標準偏差 σ に関して以下に示すような関係が提案されている (McNaughton⁶⁾, Inagaki and Kanda⁹⁾) ．

$$\frac{\sigma_i^2}{u_*^2} = \frac{\sigma_{i_in}^2 + \sigma_{i_out}^2}{u_*^2} = \alpha + \frac{\sigma_{i_out}^2}{u_*^2} \quad (5)$$

where, $i = u, v, w$

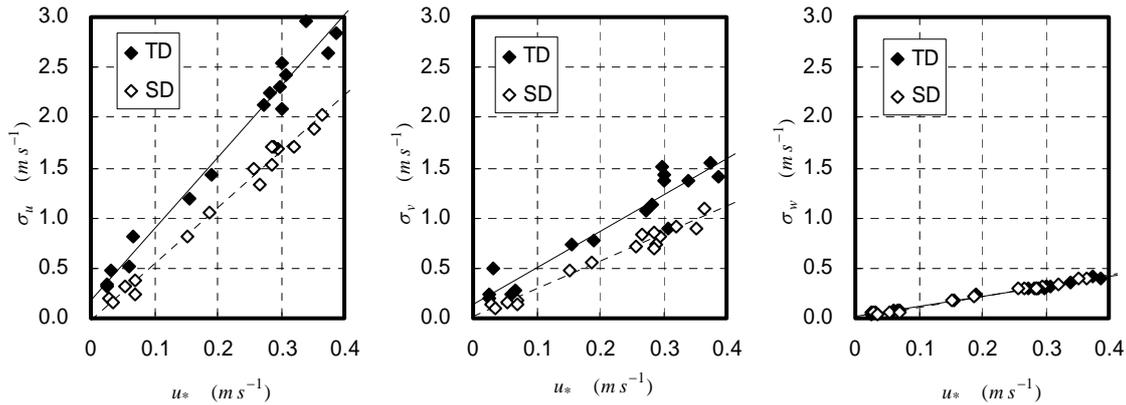


図-5 摩擦速度と各種標準偏差の関係 (TD: 低周波非除去時, SD: 低周波除去時)

表-1 各近似直線の傾きと切片

(TD: 低周波非除去時, SD: 低周波除去時)

	σ_u		σ_v		σ_w	
	TD	SD	TD	SD	TD	SD
α	7.12	5.64	3.62	2.76	1.00	1.06
$\sigma_{u_{out}}^2$	0.18	-0.03	0.14	0.01	0.02	0.01

$$\sigma_i^2 = \alpha u_*^2 + \sigma_{i_{out}}^2 \quad (6)$$

ここで、添字の *in*, *out* は内部スケール成分, 外部スケール成分を表し, α は内部スケールに從う普遍定数である. なお, 摩擦速度 u_* は以下の式で定義される.

$$u_* = \sqrt{-u'w'} \quad (7)$$

式(5)はMcNaughton⁶⁾によって提唱されており, 以下の2つの仮定から成り立っている.

a) 内部スケールの変動成分と外部スケールの変動成分は互いに独立で干渉しない.

b) 摩擦速度 u_* は内部スケールのみで決定される. 以上の仮定から導いた式(6)の右辺第一項は, 定数で表され, 第二項の切片は外部スケールの低周波成分を示している. 式(6)の関係を確かめるため, 下流側測器列の中心の風速計で得たデータを用い, 横軸に u_*^2 , 縦軸に σ_u^2 , σ_v^2 , σ_w^2 をプロットしたものを図-5に示す. また, これらのプロットから得た近似直線の傾きと切片を表-1に示す. この図を見ると低周波の有無にかかわらず u_*^2 と σ_u^2 , σ_v^2 , σ_w^2 には線形の関係があることが示された. さらに, 低周波成分除去後は切片がほぼ0となり, 式(5)の第二項が除かれている. なお, 各々の切片の値は測定誤差範囲 ($\sigma_u: \pm 0.03 (m s^{-1})$, $\sigma_v: \pm 0.02 (m s^{-1})$, $\sigma_w: \pm 0.1 (m s^{-1})$) に入っているため, 0と有意な差はないと考えられる. 以上より, 前に述べた2つの仮定は妥当であり, 低周波成分が過不足なく除去できていることを示唆している.

6. 内部スケール風速変動の水平分布形状

(1) 30分間の水平分布比較

図-4のスペクトルと同期間における乱流構造の瞬間分布特性について検討する. まず, 下流で観測し

た30分間の水平主流風速変動 u' の低周波成分非除去時 (TD) の水平断面分布を図-6a, 除去時 (SD) のものを図-6b, 低周波成分非除去時の運動量 $u'w'$ を図-6c, 除去時のものを図-6dに示す. 縦軸がスパン方向距離, 横軸が時系列を示している. 運動量に関しては四象限解析を行い, 平均運動量の3.3倍以上の強いイベントのみを抽出し, $u' < 0, w' > 0$ のときを ejection, $u' > 0, w' < 0$ のときを sweep として色分けした.

a) 水平主流風速の比較

水平主流風速に関して, 図-6a, 図-6bを比較すると, 低周波成分の除去前後では見える構造が異なることが分かる. A, B, Cの破線で囲まれたエリアに着目すると, 水平主流風速変動 u' において, 低周波成分非除去時は, 除去時と比べて水平一列方向 (y 方向) に大きな塊のような構造が目立ち, Aのエリアでは y 方向50mをすべて覆うような構造も見られる. 図4の u スペクトルでは, 低周波成分のピークは100s ~ 1000sの間にあり, A, B, Cエリアの構造は100s以上持続する構造である. このことから, y 方向に大きく広がる塊のような構造が低周波の構造に対応していると考えられる. 一方, 低周波除去時の水平分布図では, 非除去時に見られたようなスパン方向を覆うような構造は見られず, y 方向におおよそ20m程度で流下方向には100m以上にも及び筋状の構造が発達している. また, 除去時のスペクトルを見ると約1sの高周波変動が卓越している. これらより, COSMOで発達する筋状の構造は, 内部スケールに対応していると推測される.

b) 運動量の比較

次に, 運動量 $u'w'$ を四象限解析で分類した図-6c, 図-6dを比較すると, 非除去時では水平風速 (図-6a) のA, B, Cのエリアで見られたようなスパン方向に大きく広がる低周波変動に対応した ejection や sweep が見られるが, 除去時にはそのような構造は見られない. つまり, 式(1)を用いた長時間データの四象限解析には外部スケール変動の影響が含まれることを示唆している.

また, sweep と ejection の比率 (ejection/sweep) を調べてみると, 低周波非除去時は0.96で両者の割合はほぼ同じだが, 低周波除去時には1.13となり ejection が卓越している. このことから, 低周波成

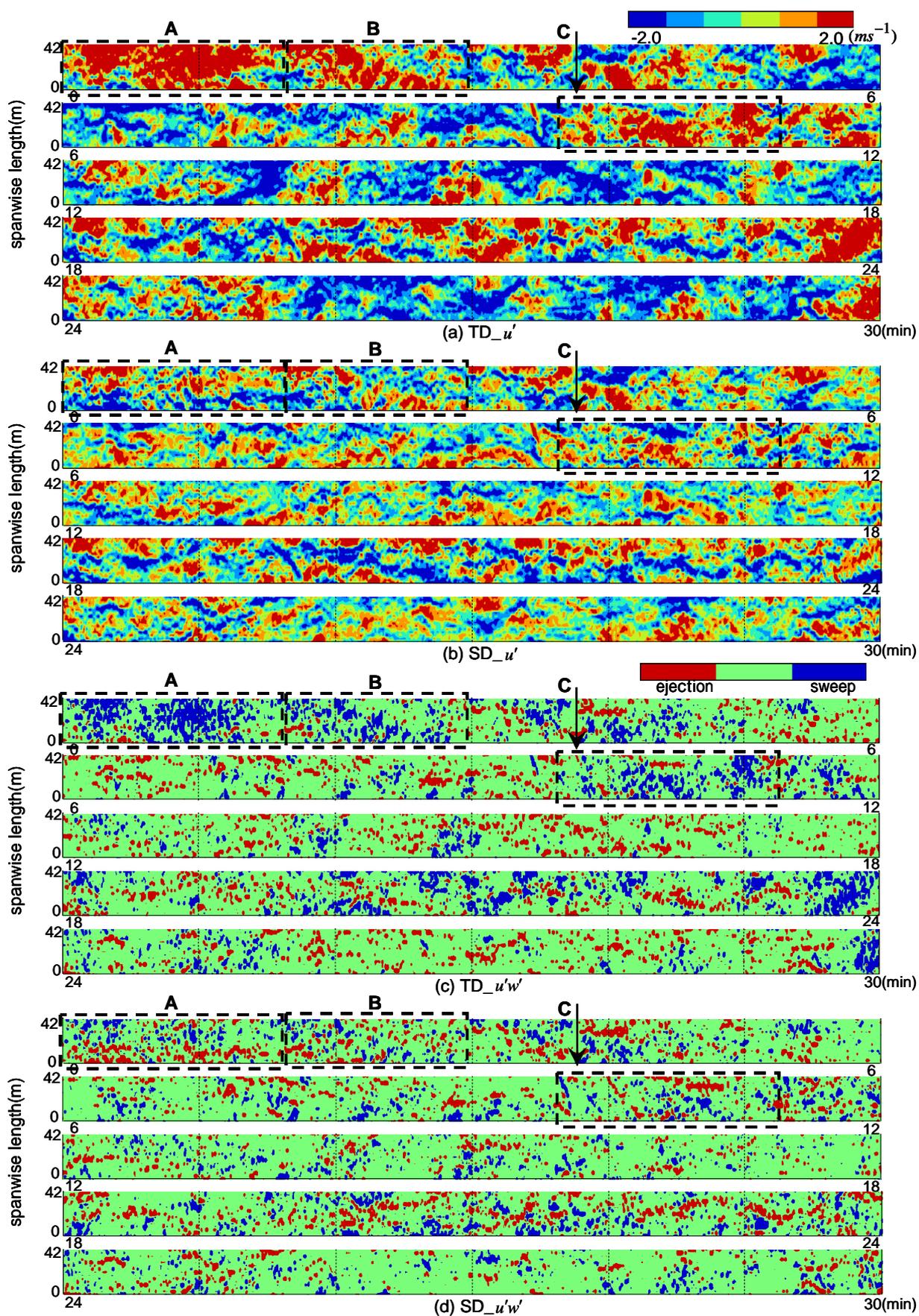


図-6 水平主流風速の水平分布形状（下流）（TD：低周波非除去時，SD：低周波除去時）

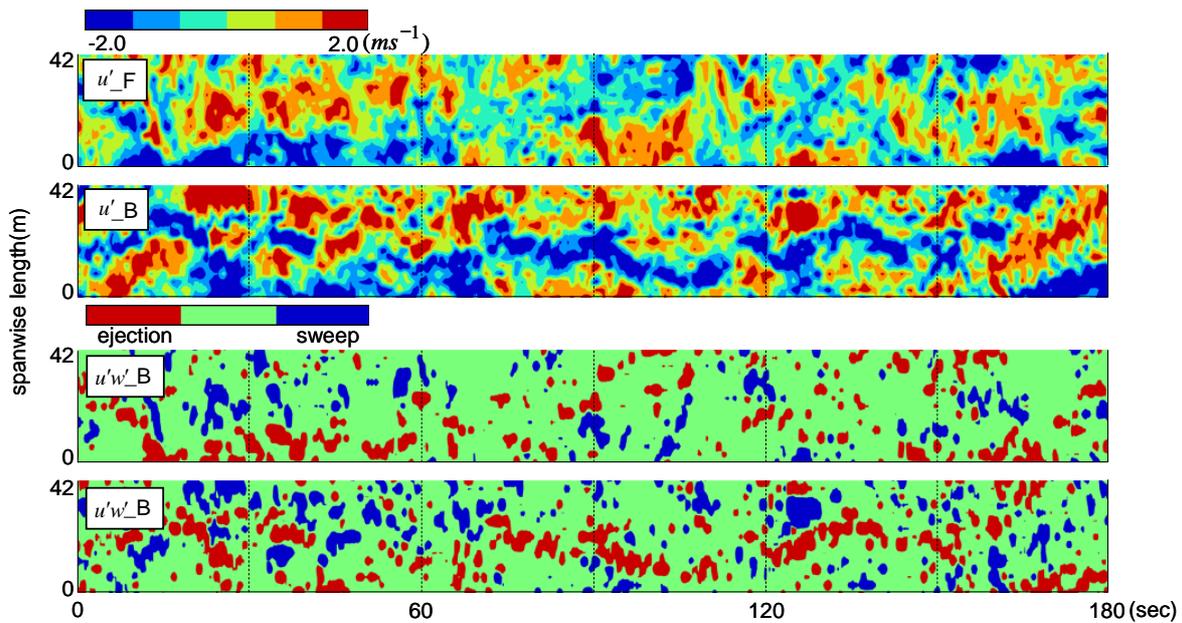


図-7 低周波除去後の各種水平形状分布 (F : front , B : back)

分はsweepに寄与していることが分かる。また、風洞実験における平板乱流境界層ではejectionが卓越することから、低周波除去後は平板境界層に似た乱流輸送が行われていることが考えられる。

(2) 上下流比較

次に、低周波除去後の u' 、 $u'w'$ について上下流構造の比較を行う (図-7)。図-7は、図-4のスペクトルと同期間の瞬間分布形状から、上下流で顕著な構造の違いが見られる3分間 (15:22 ~ 15:25) を示している。上下流を比較すると、上流側より下流側の方が筋状の構造が発達し、卓越している構造が異なることが分かる。特に60~120secの間では、下流側では明確な筋状の構造が見られるのに対し、上流側でははっきりとは構造が見られない。また、抗力係数 (摩擦速度を平均水平風速の二乗値で無次元化した値) は、上流側で0.018、下流側で0.029となり、下流側の観測値はCOSMOの凹凸の影響を受けていることが示された。以上から、これまで指摘されてきたように筋状の構造はCOSMO内において影響を受けた構造であると考えられる。

7. 結論

本研究により、以下のような結論が得られた。

- 1) 接地境界層の乱流変動は、外部スケールと内部スケールの乱流変動に分離されることを示した。
- 2) スペクトルと水平分布形状の比較から、低周波変動は運動量輸送に寄与していないことが示され、COSMOに現れる筋状の構造はinactiveな外部スケールの渦に起因していないことが示された。
- 3) 摩擦速度の二乗値 u_*^2 と、各風速変動の標準偏差の二乗値 σ_u^2 、 σ_v^2 、 σ_w^2 は比例関係になることが示された。この結果と2)を考慮すると、筋状の構造は内部スケールの変動であり、地表面起因であることが推測される。

これらの結論の普遍性を評価するには、異なる地表

面条件における大気観測や外層条件を操作できる数値シミュレーション等との比較検討が必要不可欠である。

謝辞：本研究は科学技術振興機構の戦略的創造研究推進事業 (代表研究者：神田学) の財政的支援を受けた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Roth, M.: 2000, 'Review of atmospheric turbulence over cities', *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **126**, 941-990.
- 2) Kaimal, J. C., Wyngaard, J. C., Izumi, Y. and Cote, O. R.: 1972, 'Spectral characteristics of surface layer turbulence', *Q. J. R. Met. Soc.*, **98**, 563-589.
- 3) Panofsky, H. A., Tennekes, H., Lenschow, D. H. and Wyngaard, J. C.: 1978 'The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under the unstable conditions', *Boundary-Layer Meteorol.*, **11**, 355-361.
- 4) Moriwaki, R. and M. Kanda: 2005, 'Local and global simplicity in turbulent transfer of heat, water vapor, and CO2 in the dynamic convective sublayer over a suburban area', *Boundary-Layer Meteorol.*, submitted.
- 5) 稲垣厚至, 神田学, 森脇亮, 2006: 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.
- 6) MacNaughton, K. G. and Raubach, J.: 1998, 'Unsteadiness as a cause of non-equality of eddy diffusivities for heat and vapour at the base of an advective inversion', *Boundary-Layer Meteorol.*, **88**, 479-504.
- 7) Roland B.Stull.: *An Introduction into Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publishers, 1988
- 8) MacDonald, R. W., Griffiths, R. F., Hall, D. J.: 1998, 'An improved method for estimation of surface roughness of obstacle arrays' *Atmos. Environ.*, **32**, 1857-1864.
- 9) Inagaki, A. and Kanda, M.: 'Turbulent flow similarity over an outdoor reduced urban model', *J. Fluid Mech.*, submitted.

(2007.9.30受付)