

屋外都市模型における時空間解析を用いた 乱流構造特性の把握

THE CHARACTERISTICS OF COHERENT TURBULENCE OVER REDUCED URBAN MODEL USING CORRELATION ANALYSIS

丸山綾子¹・稲垣厚至²・神田学³

Ayako MARUYAMA, Atsushi INAGAKI and Manabu KANDA

¹学生会員 東京工業大学大学院 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 博(工) 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (同上)

³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 spatial correlations of the coherent turbulence over comprehensive outdoor scale model for urban climate (COSMO) in a neutral stratification. Using the spatio-temporal correlation analysis of velocity fluctuations, we evaluated the convective velocity and the spatial and temporal scale of the coherent turbulence.

This study revealed that the convective velocity was 1.1 times faster than local mean velocity at 2H (H: height of roughness). The spanwise scale of coherent structure over COSMO was similar to the other type of surface like flat wall and vegetation. In contrast, the streamwise scale was bigger than the others.

Key Words : outdoor urban scale model, active and inactive eddies, coherent structure of turbulence, two point correlation, convective velocity

1. はじめに

近年, 都市におけるヒートアイランド現象や都市型集中豪雨といった, 都市特有の大気環境問題が顕在化している. 接地層内における様々な研究によって, これらの問題に密接に関わる接地層内の熱や水蒸気は, 地表面上空で発達する乱流構造によって輸送されることが明らかになってきた(稲垣ら¹⁾). これまでの既往の研究では, 様々な条件下において, 乱流構造の平均特性や物理過程などの議論が行われてきた. 例えばAdrianら²⁾は, 平板上における実験から乱流構造の概念図を提案し, Watanabe³⁾は植生上における乱流構造の検討を行っている. しかしながら, 自然条件下の都市における乱流構造の研究は少なく, 実際の都市上空で発達する乱流構造についてはよく分かっていない. そこで, Inagaki⁴⁾は図-1に示す屋外都市模型COSMO (Comprehensive Outdoor Scale Model experiment for urban climate)において, その立地条件を活かし, 実都市では困難な流下方向に直交する横断方向に測器を展開することによって, COSMO上空に発達する乱流構造の水平形状分布を得ることに成功している. さらに水平形状分布と時間平均統計量を比較することによって, COSMO上空で発達する乱流構造が運動量輸送の大部分を担っていることを指摘している. これらの研究によって乱流構造の定性的な特徴が明らかになってきているが, 実態である乱流構造を定量化するこ



図-1 屋外都市模型COSMO

とは困難で未だ研究例は少ない. 乱流構造の定量化によって, その実態をモデル化できれば, 乱流の制御が可能となるなど実際の都市計画に広く応用することが期待できる. そこで, 廣岡ら⁵⁾は乱流構造の定量化の新たな試みとして, COSMOで得られた水平形状分布を用い, 閾値をかけクラスター化した乱流構造を抽出し, 構造の横断方向の幅や持続時間を議論している. しかしながら, この手法は, 時系列データの水平形状分布を用いるため, 流下方向の構造の大きさの定量化には至っていない. 流下方向の大きさを定量化するためには, 乱流構造を構成する渦の移流速度を用い, 時間スケールを長さスケールに変換する必要がある. 植生や平板上では様々な移流速度が観測されているが(Shawら⁶⁾, Panofsky⁷⁾), COSMOでは観測例がなく, 明らかとなっていない. このように, 乱流構造の定量化を行うためには, 乱流構造の時空間的な特徴を把握する必要がある.

そこで本研究では, 屋外都市模型COSMOを利用

し、乱流構造の時空間的な変動を捉えるべく、測器を横断方向だけでなく、流下方向、鉛直方向に展開した観測を行った。この空間的に展開した測器間の相関係数を用いて時空間解析を行い、乱流構造の時空間的な特徴の把握を試みた。さらに、相関係数の水平形状分布を算出し、構造の大きさの定量化を行った。ところで、接地境界層内の観測値には、対数層上空に存在する運動量輸送に関与しないinactiveな外層変動と、運動量輸送に関連する地表面起因のactiveな内層変動が混在している（Inagaki and Kanda⁸⁾）。そこで本論では、丸山ら⁹⁾によって提案されている運動量輸送に関与しない大気境界層スケールの外層変動の分離法を用いて解析を行った。そして外層変動の分離前後の比較を行い、外層変動が内層変動に与える影響を検討し、さらに内層変動の大きさの定量化を試みた。また植生や平板上における結果との比較検討を行い、新たな乱流構造特性の把握を試みた。

2. テイラーの凍結仮説と移流速度

乱流構造の研究では、時系列でデータを取得するため、定量化を考える上で時間スケールを空間スケールに置き換える必要がある。そこでこれまでの研究でよく用いられている仮説がテイラーの凍結仮説である。テイラーの凍結仮説は、乱れの構造が“凍結”したまま下流に移流されるという仮定で、以下の式で示される。

$$\tau = r / \overline{U_c} \quad (1)$$

ここで、 τ はラグタイム、 r は距離、 $\overline{U_c}$ は渦の移流速度である。一般的に移流速度はこれまで平均流速 $\overline{U}$ が用いられてきた。しかしながら、既往の研究では、様々な地表面形状において渦の移流速度は平均流速 $\overline{U}$ で移流されないことが報告されている。

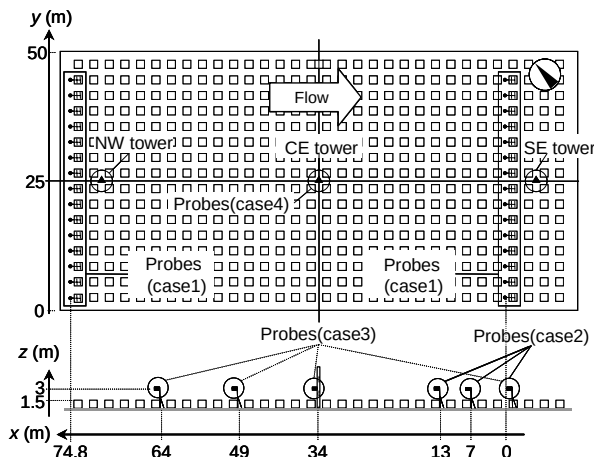


図-2 測器配置図

表-1 case別観測期間と使用機器

case No.	超音波風速計	観測期間
case1	Young Model 81000	2006/11/9~2006/1/29
case2	Kaijo DA600	2007/10/15~2007/12/3
case3		2008/2/5~2008/2/10
case4		2005/4/9~2005/6/17

例えば、Shawら⁶⁾は植生上における風洞実験を行い、植生の2倍の高さにおいて算出した渦の移流速度 U_c が平均流速 $\overline{U}$ よりも速く、その比 $U_c/\overline{U}$ が約1.2となることを指摘している。一方、Panofsky⁷⁾は地表面から2mの高さで行った平原観測から、 $U_c/\overline{U}$ が約1.1となることを指摘している。さらに、距離 r が離れるほど、移流速度は平均流速より速くなることも示唆している。

これらの結果から、渦の移流速度は地表面形状によって変化することが考えられる。また、地表面から生成される渦の移流速度は、乱流構造の移流速度と密接に関連していることが考えられ、乱流構造の特徴を決定付ける重要な情報の一つであるといえる。そこで本研究では、測器を空間的に展開した観測から、これまで実績のない都市模型上の移流速度を算出した。さらにこの移流速度を考慮した乱流構造の定量化を試みた。

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された屋外都市模型COSMO（図-1）において、超音波温度風速計を用いた観測を行った。この屋外模型都市COSMOには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が16×32個配置されている（図-2）。建蔽率は0.25であり、一般的な都市の1/5のモデルを想定している。

(2) 観測概要・観測機器

観測は図-2に示すように、case1~4の4種類行った。各caseで使用した超音波風速計及び観測期間は表-1に示す。これらの風速計で風速三成分（ u, v, w ）と温度（ T ）の同期計測を行った。case1は超音波風速計を屋外都市模型の上流と下流に15台ずつ、計30台を設置した（図-2）。本論では、この下流側の測器列とCOSMOの長軸との交点を x 軸の原点と置く。case2は、 $x=0, 7, 13\text{m}$ の位置に一台ずつ、また中央タワー（ $x=34\text{ m}$ ）に一台設置した。case3は $x=7, 13\text{m}$ に置いた超音波風速計をさらに上流側 $x=49, 64\text{m}$ に移動して設置した。この設置により、渦が移流するときの時間変化を捉えることができる。設置高さはすべてコンクリートブロックの2倍（3 m）とした。case4は、COSMO中央のタワーを用いて鉛直観測を行った。観測高度は3.0, 2.5, 2.0, 1.75, 1.5, 1.25, 1.0, 0.75（H）である。サンプリング周波数はcase1が10Hz、case2, 3, 4が50Hzである。

4. 解析概要

(1) 解析手法

本研究では以下に示す相互相関の式を用いて、構造の時空間解析を行った。

$$R_{uu} = \frac{\overline{u(r, t)u(r + dr, t + dt)}}{\sqrt{\overline{u^2(r, t)}}\sqrt{\overline{u^2(r + dr, t + dt)}}} \quad (2)$$

ここで、 r は空間座標(x, y, z)、 t は時間、 dr と dt はそれぞれ2点間の距離及び時間差を表す。変動成分 v, w, T についても同様に相関係数 R_{vv}, R_{ww}, R_{TT} を算出した。また、 u, w を用いて相関係数 R_{uw} を算出した。また、移流速度 Uc は以下の式を用いて算出した。

$$Uc = dx / \tau \quad (3)$$

ここで、 dx は2点間の流下方向(x 方向)の距離である。また、 τ は相互相関係数のピーク値が現れるまでの時間差(ラグタイム)である。case1については、外層の移流速度を推定するため、Inagaki⁴⁾によって提唱されている内層変動と外層変動を分離する以下の式を用いて、外層変動を示す15台空間平均値 $[u]$ のみを解析に用いた。

$$u = [u] + \bar{u}'_s + u''_s \quad (4)$$

ここで、 $\bar{u}'_s$ は各測器の時間平均値、 u''_s は時間平均値と空間平均値からの変動成分を示している。変動成分 v', w', T' についても同様に行う。なお、この操作の前後で運動量コスペクトル、 w スペクトルは変化しない。全てのケースにおいて統計量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(Stull¹⁰⁾)。

(2) 解析データの選別条件、サンプル数

各観測期間(表-1)に観測されたデータから以下に示す3つの条件を満たすものを選別した。

- 1.乱流強度 $\sigma_u / \bar{U}$ は一般にテイラーの凍結仮説が成立するといわれている0.5以下とした(Stull¹⁰⁾)。
- 2.風向は構造の流下方向の変動を捉えるため、COSMOの長軸から $\pm 10^\circ$ の風向偏差に収まるデータを選別した。
- 3.大気の安定度については、以下の式で定義される安定度指標が、中立の時を用いた。本研究では-0.05から0.05までの時を中立とした。

$$\frac{z'}{L} = -\frac{(g/T)(w'T')}{u_*^3 / kz'} \quad (5)$$

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 $d = 0.46H$

($H=1.5m$)である。 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。風速については、 $0(ms^{-1})$ から $0.5(ms^{-1})$ 刻みの閾値をかけ、各風速段階に分けて解析を行った。さらに、各々の段階で得られたデータ全てをアンサンプル平均したのから移流速度、平均風速を算出した。以上の条件を満たすデータは、表-2に示す。

5. 結果

(1) 移流速度比

i) 風速別、距離別比較

テイラーの凍結仮説を適用したラグタイムと相互相関から算出したラグタイムを比較する。図-3は横軸に相互相関より求めた流下方向のラグタイム、縦

軸に式(1)のテイラーの凍結仮説を用いた場合のラグタイムを示している。図-3a, bは変動成分 u', v' を用いて算出した結果である。各プロットは各測器間の距離 dx 別にプロットしている。図中の実線は、式(1)と計算結果より算出したラグタイムが等しい場合(1:1)の線であり、破線は $dx=21m$ 以上のプロットのみを用いて算出した近似直線である。 $dx=74.8m$ のプロットは外層変動、それ以外のデータは、外層変動と内層変動が混在している。

まず、図中黒丸でプロットした点に注目する。このプロットは $0.5 \sim 1.0(ms^{-1})$ の閾値をかけて算出したものである。これらのプロットとそれ以外のプロットを比較すると、黒点には規則性がなく、テイラーの凍結仮説が成立していないことが分かる。テイラーの凍結仮説は平均風速 $\bar{U}$ が乱れ成分に対して十分大きいという条件下で成立するので、COSMO上では $1.0(ms^{-1})$ 以下の流速では地表面凹凸による乱れの影響が大きく、仮説が成立しないことが示された。

次に距離 dx 別でラグタイムを比較する。図-3a, bを比較すると、変動成分 u' と v' のラグタイムには異なる傾向が見られる。まず図-3aに着目すると、全体的にどのプロットも1:1のラインよりも上部に分布していることが分かる。一方、図-3bでは、 $dx=6, 7, 13m$ のプロットは平均流速で移流した場合の実線に近いところに分布し、 $dx=21m$ 以上は図-3aと同様に1:1のラインよりも上部にプロットされている。ここで、図-3bに見られる、 $dx=13m$ までのプロットが示す挙動と $dx=21m$ 以上のプロットが示す挙動について考える。前者は参照測器との距離が比較的近い($dx=6, 7, 13m$)ので、建物高さ等で決定する内層スケールの小さな渦の相関が強く現れていると考えられる。一方後者の場合には、小さなスケールの内層の渦は、 dx が大きくなるにつれて地表面の影響を受けて渦が方向や形を変えてしまう。反対にCOSMOを覆うような約1km程度のスケールを持つ外層の大きな渦の相関が内層の渦の相関よりも顕著に捉えられていると考えられる。

ここで、inactiveな外層変動成分 $\bar{u}'_s$ のみを使ってラグタイムを算出した $dx=74.8m$ のプロットに着目してもらいたい。図-3a, bよりこれらのプロットは、 $dx=21m$ 以上のプロットと同様の傾きを持って分布していることが分かる。 $dx=74.8m$ のプロットは外層変動を捉えているので、このプロットと同様の挙動を示している $dx=21m$ 以上のラグタイムもまた外

表-2 風速閾値とサンプル数

風速 (m/s)	sample数			風速 (m/s)	sample数
	case1	case2	case3		
0.5~1.0	3	5	-	5.0~5.5	7
1.0~1.5	4	25	3	5.5~6.0	3
1.5~2.0	9	39	8	6.0~6.5	5
2.0~2.5	3	46	10	6.5~7.0	-
2.5~3.0	5	46	13	7.0~7.5	1
3.0~3.5	7	-	11	7.5~8.0	1
3.5~4.0	8	-	19	8.0~8.5	-
4.0~4.5	8	-	17	8.5~9.0	3
4.5~5.0	7	-	-	9.0~	1

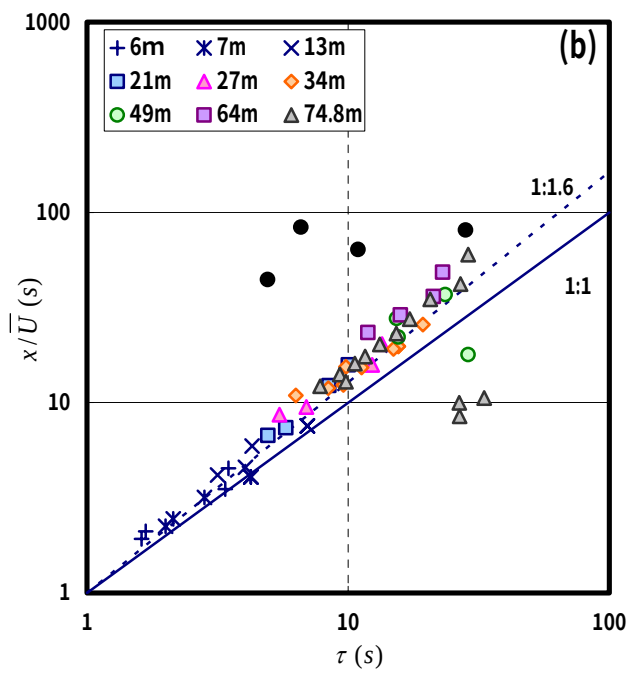
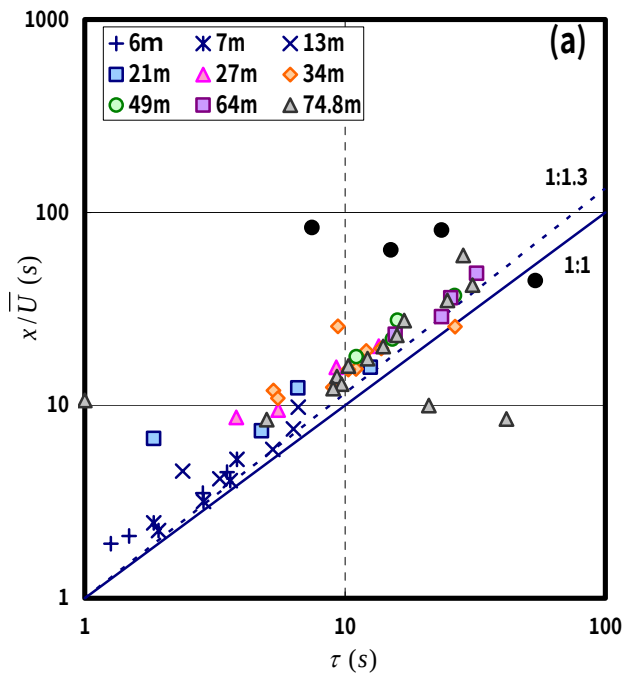


図-3 ラグタイム比較 (a) 変動成分 u' , (b) 変動成分 v'

●...0.5~1.0 ($m s^{-1}$) の閾値によるラグタイム

層変動を捉えていると考えられる。このことは先に述べた考察にも矛盾しない。以上のことを踏まえると、 $dx = 13m$ まではactiveな内層変動の移流を捉えており、 $dx = 21m$ 以上はinactiveな外層変動の移流を捉えた速度であると考えられる。しかしながら、先に指摘したように、図-3aは図-3bとは違い、 dx に関わらず全てのプロットが同じような挙動を示している。これは、横断方向の変動成分 v' よりも流下方向の変動成分 u' がより流下方向に外層の低周波成分の影響を受けやすいためであると考えられる。よって図-3aでは $dx = 13m$ までの相関にも、外層の低周波成分の影響が現れたため、 $dx = 21m$ 以上の挙動と似た傾向を示したと考えられる。以上の考察より、各々の近似直線から移流速度と平均流速の比 $Uc/\bar{U}$ を算出すると表-3のようになった。

表-3より、内層変動の移流速度は $1.1\bar{U}$ 、外層変動の移流速度は $1.3 \sim 1.6\bar{U}$ となった。変動成分 v' から得られた $dx = 13m$ までの結果に着目すると、風洞で行われた植生上の結果 ($Uc/\bar{U} = 1.2$) と近い値になっていることがわかる。風洞では外層の影響がないので、植生上における内層変動とCOSMO上における内層の変動は似た速度で移流していると考えられる。しかしながらこの結果からCOSMO上空で発達する乱流構造が、内層変動と外層変動のどちらの移流速度で移流されているかは判断できない。しかし、内層と外層の変動成分は互いに独立で十分なスケール分離ができているという仮定 (McNaughton¹¹⁾) を考えると、COSMO上空で発達する乱流構造は、内層変動の移流速度で移流していると考えられる。

ii) 自己相関係数と積分スケール

式 (4) を用い、内層変動のみの自己相関係数から積分スケール L_u 、 L_v を算出した。積分スケール

表-3 移流速度と平均流速の比

変動成分	$Uc/\bar{U}$	
	$\sim dx = 13m$	$dx = 21m \sim$
u'	1.3	1.3
v'	1.1	1.6

は自己相関係数が横軸を横切るまでの横軸と縦軸で囲まれた面積に平均風速を乗じたもので表され、代表的な渦の大きさを表す。算出した積分スケール L_u 、 L_v を建物高さ H で無次元化すると、それぞれ $L_u/H = 4.68$ 、 $L_v/H = 0.83$ となった。これは、Shaw⁶⁾ が示している変動成分 u' から算出した植生上の結果 ($L_u/H = 2.68$) よりも約2倍程度大きいことが分かった。また、Sway et al.¹²⁾ による平板上の結果から L_u/L_v は約2倍であるのに対し、COSMO上における結果は5.7倍となり、平板に対し、COSMO上では流下方向の大きさが長いことが示された。

(3) 時空間相関

i) 水平分布

図-4は、相関係数の水平分布 ($x-y$ 面) である。上段から相関係数 R_{tt} 、 R_{uu} 、 R_{vv} 、 R_{ww} 、 R_{uw} の水平分布を示している。左列に示す図-4a~eは内層と外層の変動成分が混在しており、右列の図-4f~jは式 (4) を用いてactiveな内層変動成分のみを用いて解析を行った。x方向に関しては、テイラーの凍結仮説を仮定し、時間相関の時間差に平均風速をかけることで長さスケールに変換している。

まず、TD (図-4a~e) とSD (図-4f~j) の水平形状分布を比較すると、inactiveな外層変動は変動成分 T' に最も影響を与えていることが分かる。また、図-4b、cを比較すると、流下方向の相関は TD_R_{vv} より TD_R_{uu} の方が流下方向に長く、外層変動の影響が流れ方向に長く続いていることが分かる。一方 w' の水平分布は、 TD_R_{ww} と SD_R_{ww} に

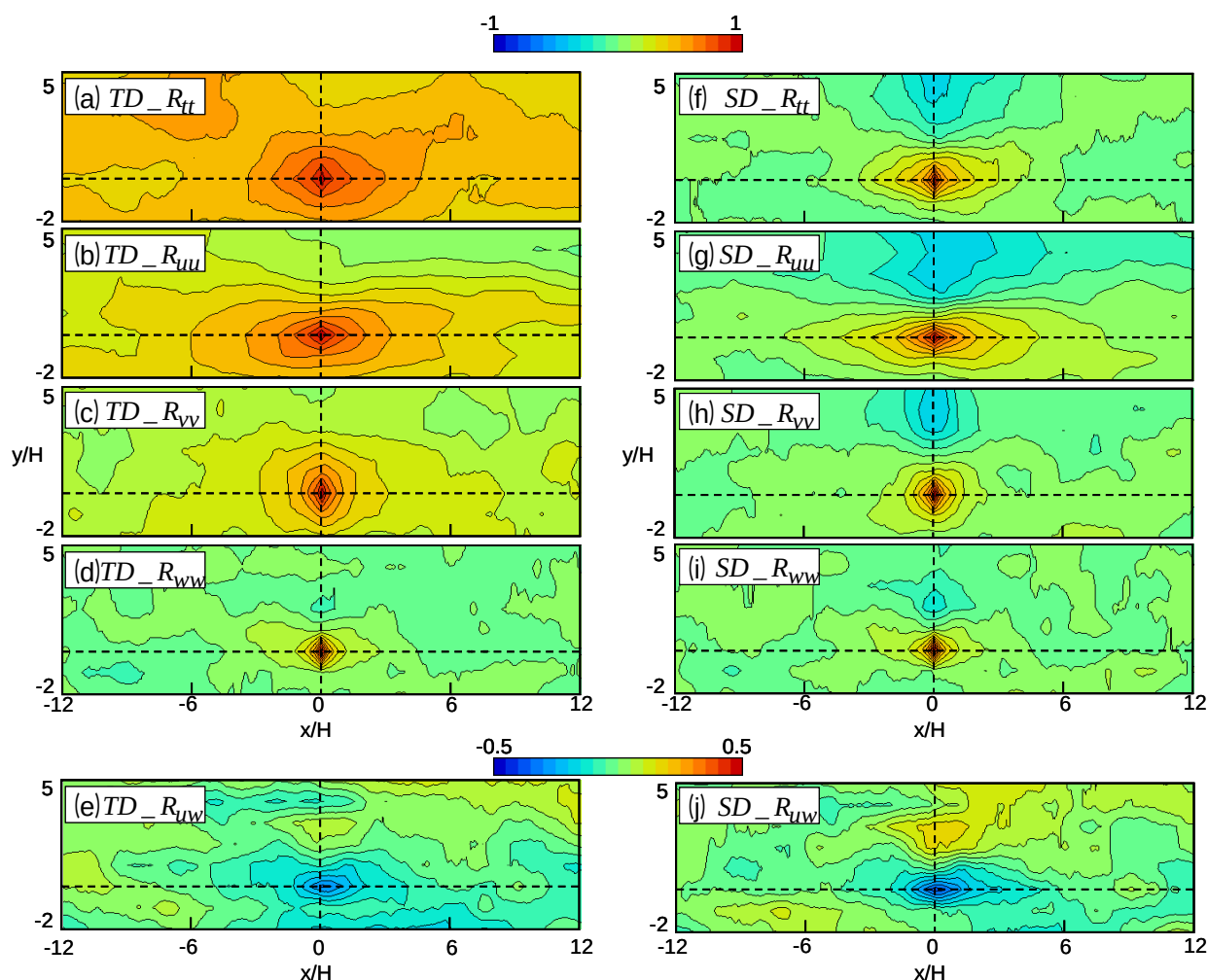


図-4 空間相関係数の水平形状分布 (TD：外層変動+内層変動, SD：内層変動のみ)

あまり変化が見られない。また、 x - y 両方向に小さい範囲で高い相関が見られ、 w' の変動は水平約 $2H$ 程度の小さな渦によって駆動されていることが分かる。次に、図-4f~jに示すactiveな内層変動の水平分布に着目すると、 SD_R_{uu} が流下方向に最も長く相関が続いていることが分かる。この SD_R_{uu} の水平分布は、Shawら⁶⁾の植生上における観測結果 ($1H$) や、Ganapathisubramaniら¹³⁾による平板上の風洞実験結果 (平板: $z/\delta = 0.5$, COSMO: $z/\delta = 0.4$) と良く似ている。また、 SD_R_{vv} の水平形状は SD_R_{uu} に比べ比較的丸まった形状を示していることが分かる。この SD_R_{vv} の短く丸みを帯びた形状は、乱流構造が蛇行するためであると考えられる。Ganapathisubramaniら¹³⁾の結果と比較すると、この SD_R_{vv} も形状が良く似ている。また、図-4h, iを比較すると、COSMO上では、 SD_R_{vv} と SD_R_{ww} の形状はほぼ同じ大きさであるが、平板では R_{vv} に比べ R_{ww} の形状が x 方向に約0.5倍、 y 方向に約0.4倍と比較的小さく観測されている。これは、COSMOではコンクリートブロックによる影響から w' 変動が大きくなり、 R_{ww} の形状が平板に比べ大きくなったと考えられる。さらに、図-4e, jに示す

TD_R_{uw} と SD_R_{uw} 水平分布を見ると、正負は逆であるが、 R_{uu} の形状と似た形状を持っていることが分かる。負の相関を示している部分はイジェクションに関連する低速流を表すため、(Ganapathisubramaniら¹³⁾) COSMOに発達する筋状の構造に対応していると考えられる。

相関係数が0.2までの構造をShawら⁶⁾ ($1H$)とGanapathisubramaniら¹³⁾ ($z/\delta = 0.5$)の結果と横断方向の幅・流下方向の長さを比較してみると、表-4のようになった。この結果から、横断方向の幅は約 $2H$ となり、植生や平板と似た大きさだが、流下方向に関してはCOSMOにおける長さが $9H$ と一番長いことが分かる。ここで、各々の移流速度 (COSMO: $U_c/\bar{U} = 1.1$, 植生上: $U_c/\bar{U} = 1.2$) を用いて換算すると、COSMOの流下方向の長さが約 $10H$, 植生上では $8.4H$ となった。このように乱流構造の流下方向を議論するときには移流速度が重要なパラメータとなる。

ii) 鉛直分布

図-5は、相関係数の鉛直分布 (x - z 面) を示している。これらの図は高度 $2H$ を基準とし、図-5と同様に長さ方向のスケール変換にはテイラーの凍結仮説を用いている。図-5より R_{uu} , R_{vv} は流下方向に前傾した構造が見られる。この解析では、Inagaki⁴⁾ が提案した式を用いることができないため、

inactiveな外層変動成分が混在している。しかしながら、McNaughton¹¹⁾によって外層の低周波変動は鉛直方向に位相差が生じないことが指摘されており、**図-5**に見られる鉛直方向の相関の時間差は乱流構造に起因したものと考えられる。植生上によるShawら⁶⁾の結果と比較すると、 R_{uu} に関しては、植生が流下方向に約12Hの構造であるのに対し、COSMOでは植生上よりも流下方向に長く相関が見られる。これは内層変動のみを用いて算出した水平形状と比べても流下方向に長いため、外層の低周波成分を捉えていると考えられる。一方、 R_{ww} は植生（1H）と比較的似た相関が見られた。

また、 R_{uu} と R_{vv} の傾きを2Hにおける平均風速を用いて算出すると約40度であった。また、(1)で得た移流速度（ $Uc/\bar{U}=1.1$ ）を用いると約37度になった。一方、Volinoら¹⁴⁾は粗・滑面境界層の乱流構造の仰角を算出しており、壁面状態によらず約13度であることを示している。これに比べCOSMOの結果はより傾きが大きいことが分かる。一方、植生上（2H）におけるShawら⁶⁾の結果から概算すると、約20度となり、植生上の結果よりもCOSMOにおける構造の傾きは大きいことが分かった。

6. 結論

COSMOにおいて時空間解析を行った結果をまとめると、**表-4**のようになった。

- ① COSMOにおいて2Hの移流速度を観測した結果、内層の移流速度は平均流速よりも速く、その比 $Uc/\bar{U}$ は1.1となった。この結果より、COSMO上で発達する乱流構造は2Hにおいて平均流速よりも早く移流することが推測される。
- ② 構造の幅や傾きを比較した結果、COSMOにおける乱流構造は、植生や平板に比べ流下方向に長く、傾きが大きいことが分かった。

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行った。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 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，**52**，445-450
- 2) Adorian, R.J., Meinhart, C.D. and Tomkin, C.D. : 2000, 'Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer', *J. Fluid Mech.*, **422**, 1-54.
- 3) Watanabe, T. : 2004, 'Large-eddy simulation of coherent turbulence structures associated with scalar ramps over plant canopies', *Boundary-Layer Meteorol.*, **00**, 1-35.
- 4) Inagaki, A. : 2008, 'Atmospheric turbulence over an array of massive cubes', Phd thesis, Tokyo Institute of Technology.
- 5) 廣岡智，稲垣厚至，神田学：2007，'乱流構造の抽出法に関する検討'，土木学会水工学論文集，**51**，241-246
- 6) Shaw, R.H., Brunt, Y. and Finnigan, J.J. and Raupach, M.R.: 1995, 'A wind tunnel of flow in waving wheat : two-point velocity statistics', *Boundary layer meteorology*, **76**, 349-376
- 7) Panofsky, H.A.: 1962, 'Scale analysis of atmospheric turbulence at 2m', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **89**, issue 380, 290-290
- 8) Inagaki, A. and Kanda, M. : 2008, 'Turbulent flow similarity over an array of cubes in near neutrality', *J. Fluid Mech.*, **615**, 101-120.
- 9) 丸山綾子，稲垣厚至，神田学：2008，'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**，in press.
- 10) Roland, B. Stull. : 1988, 'An Introduction into Boundary Layer Meteorology', Kluwer Academic Publishers.
- 11) McNaughton, 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.
- 12) Sway, N.V.C and Gowda, B.H.L. : 1979, 'auto-correlation measurements and integral scales in three-dimensional turbulent boundary layers', *applied Scientific Research*, **35**, 265-316.
- 13) Ganapathisubramani, B. et al.: 2005, 'Investigation of large-scale coherence in a turbulent boundary layer using two-point correlations', *J. Fluid Mech.*, **524**, 57-80.
- 14) Volino, R.J., Schultz, M.P. and Flack, K.A. : 2007, 'Turbulence structure in rough- and smooth- wall boundary layers', *J. Fluid Mech.*, **592**, 263-293.

(2008.9.30受付)

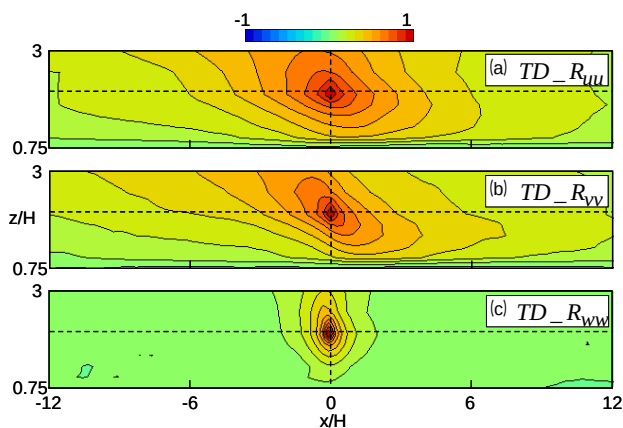


図-5 空間相関係数の鉛直分布

表-4 結果と比較

	$Uc/\bar{U}$		R_{uu} 幅		傾き	積分スケール	
			横断方向	流下方向			
COSMO	内層	1.1	$Uc = \bar{U}$	9H (1.8 δ)	40°	L_u/H	4.68
	外層	1.3~1.6	$Uc = 1.1\bar{U}$	10H	37°	L_v/H	0.83
植生 Shaw ⁶⁾	内層	1.2	$Uc = \bar{U}$	7H (0.6 δ)	20°	L_u/H	2.68
	外層	-	$Uc = 1.2\bar{U}$	8.7H	17°	L_v/H	-
平板 Ganapathisubramani ¹³⁾	内層	1.1	$Uc = \bar{U}$	0.4 δ	13°(粗・滑面)	L_u/L_v	2
	外層	-	-	-	Volino ¹⁵⁾ Sway ¹³⁾		