水工学論文集, 第50巻, 2006年2月

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

THE TURBULENT ORGANIZED STRUCTURE
OBSERVED OVER THE OUTDOOR URBAN SCALE MODEL EXPERIMENTS

稲垣厚至[1]・神田学[2]・森脇亮[3]
Atsushi INAGAKI, Manabu KANDA and Ryo MORIWAKI

[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）
[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　）
[3]正会員　工博　東京工業大学　理工学研究科土木工学専攻（　同上　）

The vertical profiles and horizontal distribution of atmospheric turbulence were observed at an outdoor urban scale model site. The model dimensions were 50 x 100m, with 1.5-meter cubic roughness blocks arranged uniformly. Eight sonic anemometers were arranged vertically or horizontally in the site to obtain the vertical profiles or horizontal distribution. In this study, we focused on the atmospheric stability effect on the vertical profiles and the horizontal distribution of the turbulent structure over the model site.

The quadrant analysis was conducted using the data set of the vertical distribution. The analysis showed the dependence of the turbulent motion on the atmospheric stability (z'/L). The sweep mode is mostly dominant at all height in the surface layer when the stability is stable. In case of the unstable atmospheric condition, the ejection mode can crossover the sweep mode at the higher portion in the surface layer.

The streak pattern was observed in a turbulent flow over the building like roughness from the measurement of the horizontal distribution. The width was about 3 or 6 times larger than that of the blocks. This result strongly implies the importance of the horizontal distribution the turbulent structure over urban area.

Key Words : *turbulent organized structure, urban scale model, outdoor experiment, stability effect, horizontal distribution*

１．はじめに

近年における都市の発展に伴い、ヒートアイランドや都市大気汚染といった多様な都市大気環境問題が顕在化してきた。都市幾何形状が作り出す大気乱流構造は建物群内外での熱・水・物質輸送過程を直接的に決定するため、これの把握は諸問題の解決に必須である。また都市大気乱流構造の把握は都市接地境界層のモデル化のための重要な情報を与え、都市を対象とした局地気象モデルの高精度化につながる。さらに近年の研究より点計測値の空間代表性やエネルギーインバランス問題などの乱流組織構造との関連が指摘されており(Kandaら[1])、都市大気観測に対しても非常に重要役割を持つ。

既往の研究としては、Oikawa and Meng[2)]が都市域での現地観測により組織構造の解明を試みている。Moriwakiら[3)]は都市現地観測において熱・水蒸気・CO_2の乱流輸送特性について検討を行っている。しかしながら都市大気に関する研究例は他の領域(植生、裸地等)に比べ依然として少なく、実際に都市上空でどのような乱流構造が形成されるのか解明されていない。特に鉛直分布の大気安定度依存性や、水平分布などについては研究例がほとんど無い。主な原因として、近隣居住区への配慮の必要性から観測タワーの設置場所の確保は困難であり、他に使用可能な観測機器、観測手法なども大きな制限を受ける。また都市の多様性、複雑性などのため一般性のある議論が困難であることなどが挙げられる。

これらのボトルネックを打破するため、屋外都市スケールモデル実験により都市接地境界層で発達する乱流構造について検討した。その特色として、1)構造物の幾何形状、物性、配置等が制御できる点、2)大規模かつ長期的な観測ができる点、3)風洞と異なり屋外の自然条件（自然風、日射）のもとで実験する点などである。この観測場において、複数の超音波風速計を用いて乱流構造の鉛直、水平分布を観測した。本論文では特に鉛直分布の大気安定度依存性、乱流構造の水平分布について焦点を絞る。

図-1　屋外都市模型写真

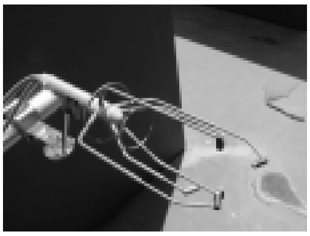

図-2　風速計プローブ
(Kaijo TA90-AH)

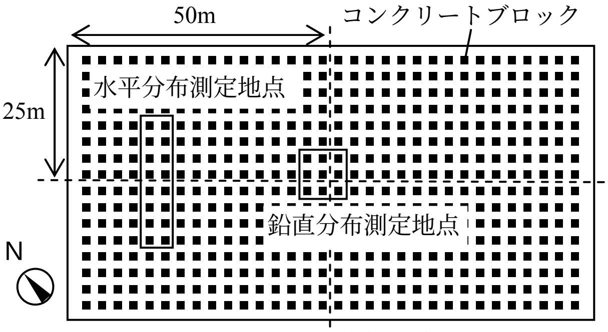

図-3　屋外都市模型略図

2．屋外都市スケールモデル実験概要

(1) 観測サイト

埼玉県の日本工業大学の敷地に作成された屋外スケールモデル(**図-1**)において、超音波温度風速計を用いた乱流観測を行った。観測サイトについては**図-3**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)。サイトの中央に高さ8m程度のタワーを建て、これを利用して鉛直プロファイルを測定した。冬季は北西の風、夏季は南東の風が卓越する。

(2) 超音波風速計

鉛直分布の測定にはKaijoの超音波風速計(DA600, TR90-AH)を用いて風速三成分(u , v , w)と温度(T)を測定した。プローブのパスは5 cm、サンプリング周波数は50 Hzで、最大9台の同期測定を行った。プローブの形状から（**図-2**）、正面から水平±45°以内に主流風向が収まる時のデータのみ使用した。

水平分布を測定する際には上記のKaijoの風速計8台とYoungの超音波風速計(Model81000)8台を併用した。Model81000のパスは15cmで、サンプリング周波数は20Hzである。そのためKaijo風速計のサンプリング周期も20Hzに揃えて同期計測を行った。

(3) 鉛直分布計測

図-3中央の実線で囲われた場所において乱流統計量の鉛直分布を測定した。フェッチは北西風時に約50m（約33H）となる。風速計の設置高度は以下の2通りで測定を行った。なお高度表示は実都市との比較のため、建物高さHで標準化した値で示す。

時間平均統計値とスペクトル解析データの測定(**図-6**、**7**、**10**及び**図-11**、**12**)には高度4H、3H、2H、1.5H、Hの5高度にKaijoの超音波風速計を設置した(表-1, Case 1)。水平位置は**図-4**に示すように、主流風向に対して「Gap」の位置にあたる。この鉛直配置と同時に水平位置「Street」と「Cross section」（**図-4**参照）において、高度2Hと1.5Hの2高度にそれぞれ風速計を設置し、Gapで測定された鉛直プロファイルの空間代表性について検討を行った。観測期間は2004年12月16日から2005年1月29日にかけて、冬季の鉛直プロファイルが測定された。

また別な配置として、8台のKaijo超音波風速計を縦一列に配置した(**表-1**, Case 2)。設置高度は上から3H, 2.5H, 2H, 1.75H, 1.5H, 1.25H, H, 0.75Hである。水平位置は図-4に示すGapの真上にあたる。この配置で2005年4月19日から同年6月17日の間観測を行った。この時期は卓越風向の変わり目であり、安定した時間平均統計値が得られなかったため、主に短時間の乱流構造解析(**図-8**)にのみ利用した。

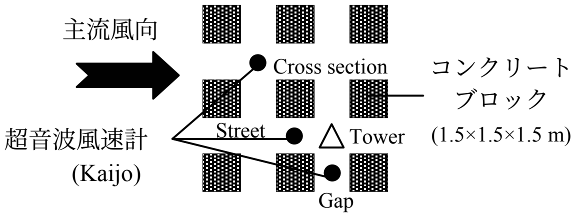

図-4　超音波風速計配置図(鉛直分布)

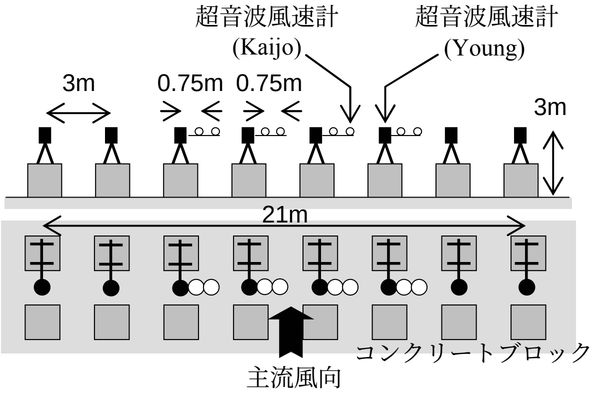

図-5　超音波風速計配置図(水平分布)

表-1　超音波風速計配置位置

Case	観測対象	風速計	水平位置	設置高度
Case 1	鉛直プロファイル スペクトル	Kaijo DA600	Gap	4H, 3H, 2H, 1.5H, H
			Street	2H, 1.5H
			Cross section	2H, 1.5H
Case 2	瞬間構造	Kaijo DA600	Gap	3H, 2.5H, 2H, 1.75H, 1.5H, 1.25H, H, 0.75H
Case 3	水平分布	Kaijo DA600	**図-5**参照	2H (水平方向に8台)
		Young Model81000	Gap	2H (水平方向に8台)

表-2　測器間および測定場所の違いによる標準偏差

測定項目	測器間 標準偏差	水平位置間標準偏差	
		高度 2H	高度 1.5H
U	0.020	0.053	0.039
σu	0.017	0.024	0.033
σv	0.011	0.019	0.020
σw	0.016	0.030	0.046
σT	0.025	0.026	0.033
u'w'	0.206	0.135	0.177
w't'	0.056	0.023	0.061

(測器間は9台、水平位置は各高度それぞれ3台比較)
(Kaijoの風速計のみ使用)

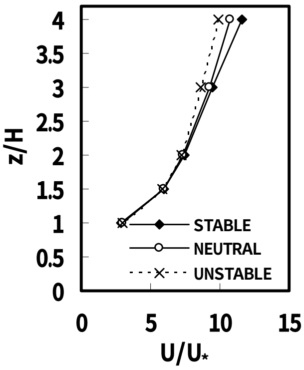

図-6　平均風速鉛直分布

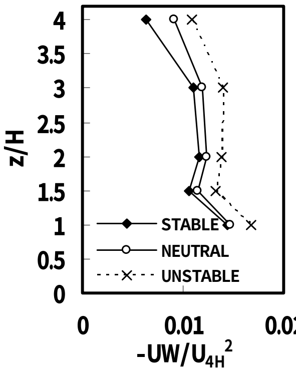

図-7　運動量鉛直分布

(4) 水平分布計測

水平分布の測定には卓越風向に対して垂直な方向に8台のKaijo風速計と8台のYoung風速計を設置した(**表-1**, Case 3)。設置位置は**図-3**左側の実線で囲われた部分である。詳細な配置は**図-5**に示すように、Youngの風速計を等間隔で8ブロックに渡って配置し、その中央付近にKaijoの風速計を8台集中させた。設置高度は全て2Hである。水平分布の観測期間は2005年7月8日から8月2日であり、この時期は南東が卓越風向となるため、フェッチ距離は80m程度（約53H）確保される。

(5) 解析手法

風速データには傾度補正を施した。平均化時間については、鉛直プロファイルの算出には30分平均を行い、瞬間構造を捉えるための時間変動成分の算出には比較的短時間である1分平均を行った。1分平均は平均時間の間に風向・風速が大きく変化しないようにするためである。

得られた統計値を大気安定度によって安定、中立、不安定の３通りに分類した。大気安定度には以下の値を用いた。

$$\frac{z'}{L} = -\frac{(g/T)(\overline{w'T'})}{u_*^3/kz'} \qquad (1)$$

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Macdonaldの式[4)]を用いて算出し、その結果 $d = 0.46$H であった。L はオブコフ長さ(m)、g は重力加速度(m s^{-2})、$\overline{w'T'}$ は顕熱フラックス(K m s^{-1})、u_* は摩擦速度(m s^{-1})、k はカルマン定数(= 0.4)である。この大気安定度指標を用いて、本研究では(z'/L > 0.01)を安定、(z'/L < -0.0075)を不安定とし、どちらにも当てはまらないものを全て中立として取り扱うこととした。これに従いCase 1における個々の30分平均値を分類した結果、安定171サンプル、中立374サンプル、不安定95サンプルとなった。時間平均統計値算出後に、それぞれの安定度別にアンサンブル平均を行った。

データ選別条件として風向エラーの他に雨天時のデータを除いた。また運動量や顕熱フラックスの測器間標準偏差を算出する際にはゼロ割による値の発散を防ぐため、運動量と顕熱フラックスに閾値を設け、それぞれ絶対値が0.01 m^2 s^{-2}以下、あるいは0.01 K m s^{-1}以下のデータを全て除いた。

3．測器間の標準偏差及び鉛直プロファイル観測地点の空間代表性

Gapで測定された鉛直プロファイルの空間代表性について検討するため、まず9台のカイジョー超音波風速計間の機差から検査した。ブロックが並べられる前のコンクリート平板上で、9台の超音波風速計を高度1mに30cm間隔で並べてキャリブレーションを行った。結果を**表-2**に示す。個々の分散(σ)の測器間標準偏差は数パーセント程度であるが、フラックスの値、特に運動量フラックスに至っては20 %以上の大きなばらつきが出た。

これを踏まえて、Gapでの鉛直プロファイルの空

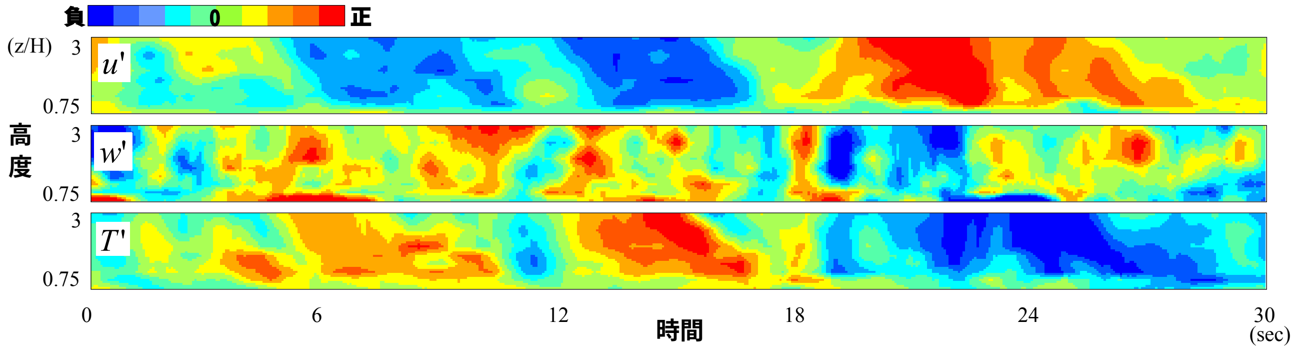

図-8　各種時間変動量の鉛直-時系列分布
平均風速 (2H)：5.4 m s^{-1}, 高度：3H～0.75H, コンター範囲 u':-4～4 m s^{-1}, w':-1～1 m s^{-1}, T':-1～1 K

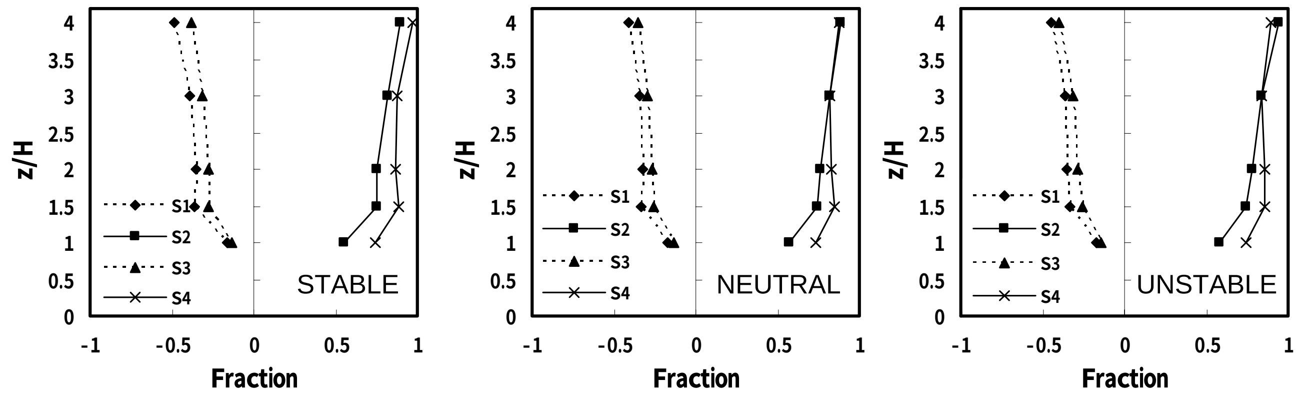

図-10　安定度別四象限解析の鉛直分布（左：安定、中：中立、右：不安定）

間代表性について検討する。**図-4**に示すGap、Street、Cross sectionの高度2Hと1.5Hでの同期測定データを基に、同一高度で水平位置の違いによる統計値のばらつき(標準偏差)を算出した(**表-2**)。これを測器間のばらつきと比較するとその差は1%程度であった。これは乱流のエルゴード性の他に、自然風の風向が変わることなどによって、高度2Hでは地表面の局所的な凹凸の影響は微小となったと考えられる。この結果より、測器間誤差程度のばらつきを許容した上で、Gapで測定された1.5Hより上の鉛直統計量を領域代表値として、以下議論を展開する。

４．鉛直分布

(1)平均風速、運動量プロファイル

まず始めにCase 1で測定された、摩擦速度で無次元化した平均風速の鉛直分布を図-6に示す。縦軸は建物高さで無次元化した高度である。この図によると、大気が不安定なときは上下の風速差が小さくなり、大気が安定になるにつれて上下方向の風速差は大きくなる。次に運動量輸送を高度4Hの平均速度の2乗で無次元化した値の鉛直分布(**図-7**)を見てみると、不安定なときほど全体的に運動量輸送が大きな値を持ち、大気が安定になるにつれて小さくなる。

これらの解釈としては、大気が不安定である場合は浮力の影響により接地境界層内での上下混合が盛んになり、下方の低速の流体がより上方の高速の空気と混ざり合うため、鉛直方向の風速差が緩和された。大気が安定なときは空気の上下運動が浮力により緩和されるので、上下の空気が混ざりにくく、平均風速差がやや大きくなった。

(2) 乱流組織構造の鉛直分布

鉛直方向に配置された8台の風速計で計測したデータをもとに(Case 2)、 乱流の瞬間鉛直構造について検討する。まず各点で測定された風速3成分と温度を時間平均値と変動成分に分解する。

$$u = \overline{u} + u' \;,\; v = \overline{v} + v' \qquad (2)$$
$$w = \overline{w} + w' \;,\; T = \overline{T} + T'$$

$\overline{\ \ }$ は時間平均、 $'$ は時間平均からの変動成分を表す。平均化時間は1分とした。

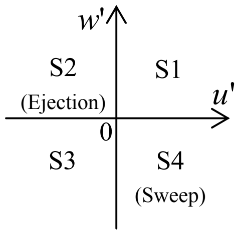

図-9　四象限解析

図-8は各高度における時間変動成分の時系列（u', w', T'）を描かせたもので、縦軸に各観測点の高度を建物高さで無次元化した値（z/H）、横軸に時間をとる。

観測点数は縦に8点で、点と点の間の値は線形補完してコンター図を作成した。測器のサンプリング間隔は0.02secであるが、この図の時系列には移動平均を施しており1secの解像度となっている。図は正午近くの30秒間のデータを示したものであり、大気安定度は不安定である。

図-8の時系列6～12秒の間に平均風速の遅い、持続した構造の通過が確認できる。同時刻に温度の上昇、及び上昇流が生じている。この組織構造はイジェクション(Ejection)に相当する。一方平均風速が比較的速い組織だった構造が18～24秒の間確認でき、それに伴い温度の降下と下降流が生じている。これはスウィープ（Sweep）に相当する。

(3) 四象限解析

次に運動量に関して四象限解析を行った。四象限解析は水平風速と鉛直風速の時間変動成分(式2)の組み合わせによって運動量輸送を**図-9**に示す4つの象限に分類し、各象限が全運動量輸送に寄与する割合を調べるものである。先ほど示したイジェクションによる輸送は第2象限(S2)、スウィープは第4象限(S4)に相当し、S2とS4のどちら構造が卓越するか調べた。なおS1、S3はS2、S4に対し受動的に生じる現象（Inward/Outward interaction）であり、本考察ではS2、S4の挙動のみに着目した。

図-10はCase 1のデータに関する、各象限の寄与率の鉛直分布を安定度別に描かせたものである。これらの高度では大方スウィープが卓越することが見て取れる。しかし不安定になるにつれて、上方へ行くに従いスウィープとイジェクションの比率が接近し、不安定時の4Hでは両者の比率が逆転している。

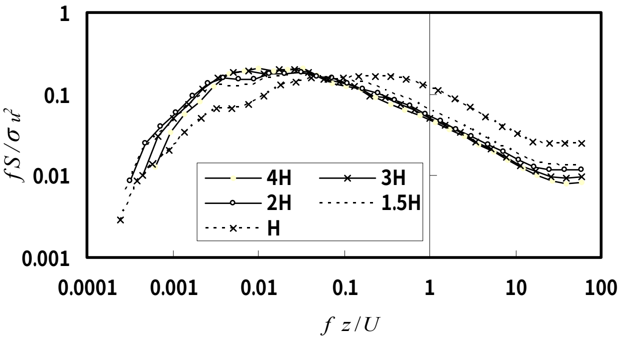

図-11　水平主流風速の周波数解析（不安定時）

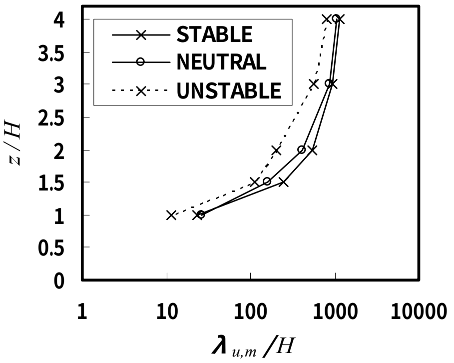

図-12　スペクトル解析による卓越波長の高度変化

このような都市接地境界層における四象限解析の大気安定度依存性は、東京都久が原における実都市観測(Moriwakiら)においても観測されている。

ここから得られる知見として、1) 都市幾何構造が作り出す接地境界層ではおおむねスウィープが卓越する、2) 大気安定度が不安定になるに従いイジェクションの比率が上昇する、ことなどである。

まず前者について考える。Raupachら[5)]の混合層相似性(Mixing layer analogy)によると、スウィープが卓越するのは変曲点不安定によって生成された乱流構造に起因する。例えば植生キャノピー高さの1～2倍の高度ではイジェクションの2倍近いスウィープの比率が観測されているが(Shawら[6)])、これはキャノピー内と上空大気の風速差によって変曲点が生成され、変曲点不安定による乱流組織構造が発達した結果と考えられる。逆に風洞実験における平板乱流境界層ではイジェクションが卓越することが報告されている(Krogstadら[7)])。平板上では風速分布の変曲点は生成されず、壁面摩擦により励起されるストリーク構造が発達する。つまり混合層相似性の枠組みでは変曲点の有無によって植生乱流と平板乱流は区別される。しかし近年の研究により変曲点不安定による乱流組織構造も平板乱流のようなストリーク状の構造を持つことが指摘されており（Watanabe[8)]）、両者の構造の違いについては明らかにされていない。

これらを踏まえて都市の乱流構造を考える。都市キャノピーの屋根面直上は平板のような働きをするが、道路の上では複雑な流れをもつキャノピー内の流れと上空大気の流れの間に風速差ができるため、変曲点不安定が起こり、これが植生のような混合層乱流構造を発達させうる。つまり都市幾何形状が作り出す乱流構造は壁面摩擦が作る平板乱流と、変曲点不安定で生成される混合層乱流の中間的な位置づけにあると考えられる。そのためスウィープが卓越するものの、イジェクションとの差は植生での差ほど大きくならないと考える。

また大気が不安定になるにつれてイジェクションの寄与が増加する原因として、大気が不安定になることで上下混合(運動量交換)が盛んになり、接地境界層内における上下の風速差が緩和されることは先に説明した通りであるが、それがシアー不安定を引き起こすような変曲点の形成を緩和したのではないかと考える。逆に大気が安定な場合には平均風速の上下差が大きくなるため、鋭く急な変曲点が形成され、それが強い混合層乱流を生み出し、それに伴ってスウィープの寄与が大きくなったと考える。

(4) スペクトル解析

スペクトル解析により乱流構造の時間、空間スケールについて検討した。スペクトルはCase 1での1時間データから算出した。**図-11**は平均主流風速uのスペクトルをアンサンブル平均したものである。横軸は水平風速と高度で無次元化している。4H~1.5Hまではほぼ同等の形状であり、高度H（屋根高さ）でのスペクトルは全体的に低周波側にある。これらの形状をz/Hを基準に実都市（Roth[9)]）と比較するとピーク周波数などよく一致することから、典型的な都市接地層のスペクトルであるといえる。

次に各高度のスペクトルピーク周波数をテイラーの凍結仮説により空間スケールに変換した。**図-12**は安定度別のピーク波長の高度変化を示す。上方へ行くほど卓越渦スケールは大きくなることが示されている。この図より、接地境界層内と推定される高度2Hではおよそ100mオーダーの渦が卓越しており、これは**図-8**で示した構造のスケールを表しているものと考えられる。ただこの統計値は同オーダー程度のばらつきがあり、これ以上の厳密な議論は難しい。高度Hでのピーク周波数を空間スケールに変換すると10mのオーダーとなり、これは地表面の粗度ブロック配列の空間スケールとほぼ一致し、地表面の起伏が直接作り出す渦が卓越していることが分かる。

5．水平分布

(1) 瞬間構造

図-5の配置で測定された乱流構造の水平分布について述べる。**図-13**はu', w', T'のスパン方向分布の時系列変化を示したコンター図である。縦軸がスパン方向距離、横軸が時系列を示す。変動成分算出のための平均化時間を1分とし、その間になるべく風向が一定でかつ風速計の並びに対して垂直に風が吹く時のデータを解析した。なお図は日中の観測結果であり、大気は不安定であった。

この図の時間軸をテイラーの凍結仮説により空間

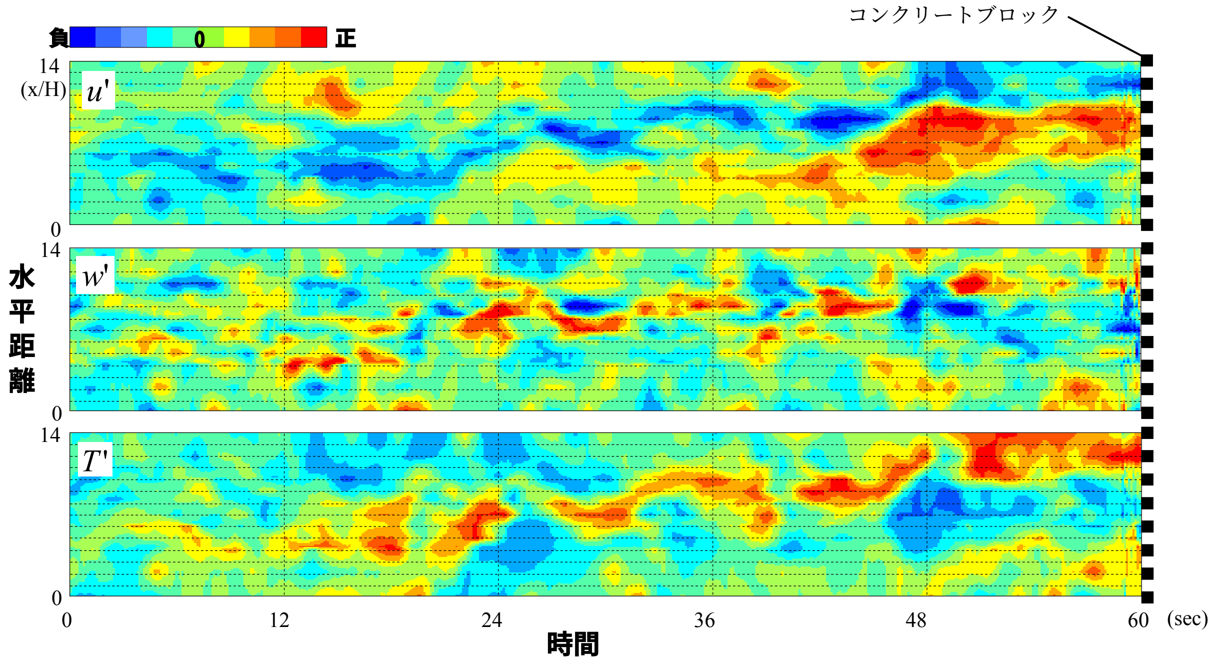

図-13 各種時間変動量の水平-時系列分布 (2005年8月4日16時32分より1分間)
平均風速：2.2 m s^{-1}, 高度：2H, コンター範囲：u':-2〜2 m s^{-1}, w':-1〜1 m s^{-1}, T':-2〜2 K

軸に置き換えて考えると、各種変動値が風向方向に延びたストリーク構造を構成しているのが分かる。そのストリーク幅は3〜6H程度で個々の地表面建物より大きい。**図-8**はこの平面上の一側線上を捉えていたことになる。このような構造は壁面乱流特有の構造と考えられていたが、前述の通り変曲点不安定からも生じることが指摘されている（Watanabe[8]）。

この結果はこれまで鉛直一次元的に取り扱われてきた都市乱流構造研究に対して、水平空間展開した議論の必要性を強く示唆するものである。

6．結論

本研究における屋外スケールモデル観測において、以下のような結果が得られた。

1) 都市幾何形状が作り出す接地境界層内ではスウィープが卓越するが、大気安定度が不安定になるにつれて上方でイジェクションの割合が増加し、スウィープとの比率が逆転することがある。都市大気乱流は平板乱流と混合層乱流の中間的な立場に位置するためスウィープとイジェクションが近い比率で存在し、大気が不安定になると浮力による大気混合がシアーの変曲点を緩和するため上空でスウィープの比率が減少したためと考えられる。

2) 乱流構造の水平分布観測により、建物の3〜6倍程度の幅を持ったストリーク構造が発達していることが確認された。水平・鉛直風速変動、温度変動はその構造によく対応している。

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) Kanda,M., Inagaki,A., Letzel,M.O., Raasch,S., Watanabe,T.:2004, 'Les Study of the Energy Imbalance Problem with Eddy Covariance Fluxes', *Boundary-Layer Meteorol.*, **110**, 381–404.
2) Oikawa, S. and Y. Meng, :1995, 'Turbulence characteristics and organized motions in a suburban roughness sublayer', *Boundary-Layer Meteorol.*, **74**, 289-312.
3) Moriwaki, R. and M. Kanda, : 2005, 'Local and grobal simplicity in turbulent transfer of heat, water vapor, and CO_2 in the dynamic convective sublayer over a suburban area', *Boundary-Layer Meteorol.*, submitted.
4) 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.
5) Raupach, M. R., Finnigan, J. J., and Y. Brunet,: 1996, 'Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing layer analogy', *Boundary-Layer Meteorol.*, **78**, 351-82.
6) Shaw, R. H., and J. Tavangar,.: 1983, 'Structure of the Reynolds Stress in a Canopy Layer', *J. Appl. Meteor.*, **22**, 1922–1931.
7) Krogstad, P., Antonia, R. A., Browne, L. W. B.: 1992, 'Comparison between rough- and smooth-wall turbulent boundary layers', *J. Fluid Mech.*, **245**, 599-617.
8) Watanabe, T.: 'Large-eddy simulation of coherent turbulence structures associated with scalar ramps over plant canopies', *Boundary-Layer Meteorol.*, **00**, 1-35,2004.
9) Roth, M.: 2000, 'Review of atmospheric turbulence over cities', *Q. J. R. Meteorol. Soc.*,**126**, 941-990.

(2005.9.30受付)