

屋外都市模型のキャノピー層における 瞬間温度場の形成機構

MECHANISM OF TEMPERATURE FLUCTUATION WITHIN THE
BUILDING CANOPY OVER REDUCED URBAN SCALE MODEL

稲垣厚至¹・萩島理²・成田健一³・神田学⁴

Atsushi INAGAKI, Aya HAGISHIMA, Ken-ichi NARITA and Manabu KANDA

¹正会員 博(工) 東京工業大学助教 理工学研究科(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1 I4-9)

²正会員 工博 九州大学准教授 総合理工学研究院(〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1)

³工博 日本工業大学教授 工学部建築学科(〒345-8501 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台4-1)

⁴正会員 工博 東京工業大学准教授 理工学研究科(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1 I4-9)

This study investigated the temperature fluctuation field within the canopy layer over a reduced urban scale model. We focused on temperature fluctuation contributions of the coherent structure of turbulence within the inertial sub-layer, which is characterized by streaky structures of low momentum region, and also the inactive low-frequency motion included in the horizontal velocity components of the atmospheric flow.

The temperature fluctuation within the canopy layer is strongly affected by the coherent turbulence developed in the inertial sub-layer. Passage of the streaky structures of low momentum region caused the increase of temperature at the underlying canopy layer. The effect of the coherent turbulence penetrated until the ground surface.

Key Words : *Turbulent organized structure, urban canopy layer, atmospheric turbulence, outdoor reduced urban scale model, temperature fluctuation*

1. はじめに

都市の建物高さ以下の空間における乱流場は我々の生活環境に密接に関わっている。例えば人体に影響を及ぼす熱や汚染物質の動態は乱流過程に支配される。

しかしながら、建物近傍の流れ場や乱流過程は非常に複雑なためあまり良く理解されていない。その基礎的な知識として、Oke¹⁾が提案した平均流れ場に関する3つのフローレジームがあるが、近年の現地観測²⁾や数値実験³⁾から、瞬間的な流れの変動場はそれらからかけ離れた構造を持つことが明らかにされている。

都市大気境界層は特徴だった複数の層から成る。まず上空の熱的な対流に支配される乱流混合層(Mixed layer)、主に地表面摩擦によって駆動され、平均風速の対数則やモニン・オブコフ相似則が成立するとされる慣性層(Inertial sublayer)、そして建物後流の直接影響が及ぶ粗度境界層(Roughness sublayer)があり、特に建物高さ以下の層をキャノピー層(Canopy layer)と呼ぶ。

都市キャノピー層の流れ場について、これまでの研究では主に建物一区画に焦点を絞った研究がなされてきた。その一方でこれまで行われてきた屋外都市模型実験^{4),5),6)}

より、都市慣性層において、建物模型の数十倍に及ぶような巨大な乱流組織構造が発達し、それが慣性層内の運動量や熱輸送の大半を担っていることが明らかにされた。しかしそのような乱流組織構造と、キャノピー内の乱流輸送の関係についてほとんど分かっていない。その理由は現地観測、室内実験ともに、凹凸面上の慣性層における大規模乱流構造の観測自体が困難であり、それと同期したキャノピー層の乱流観測が行われていないためである。

そこで本研究は屋外都市模型実験(図-1)により、慣性層とキャノピー層の風速と温度の多点同期計測を行い、都市キャノピー層における温度変動場の形成機構と上空で発達する乱流構造との関連性について検討した。本屋外都市模型におけるキャノピー層の流れについては瀧本ら⁷⁾や佐藤ら⁸⁾によって詳細な観測が行われているが、それらに対して本研究は上空の大規模乱流構造が及ぼす影響に着目している点が特色として挙げられる。

2. 理論

(1) アクティブ・インアクティブ変動成分の分離

慣性層における乱流変動はアクティブな変動とインアクティブな変動が混在している⁹⁾。アクティブな変動とは運動量や熱の乱流輸送に直接的に寄与する変動で、主に地表面摩擦によって駆動される渦に起因し、インアクティブな変動とは乱流輸送に直接影響を及ぼさない、外層起因の低周波水平風速変動である。本研究では両者の変動を分離する手法⁴⁾を用いて、それぞれがキャノピー層の温度変動場に及ぼす影響を検討する。

アクティブな変動はインアクティブな変動の影響を受けず、両者が線形分離できると仮定する。さらに、アクティブな変動に対してインアクティブな変動が十分大きいとすると、その中間的な大きさの空間フィルタを瞬間的な流れ場に施すことで両者が分離される。

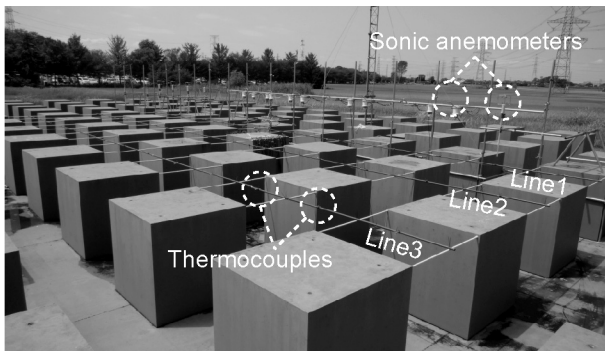


図1 屋外都市模型 (COSMO)

(2) 条件付アンサンブル平均

乱流構造の平均像を理解する手法の一つとして、条件付アンサンブル平均がある。ある波形の中の特徴的なイベントを抽出し、それを中心に波形を平均することで、イベントと前後の波形の関係性を見るのに有効である¹⁰⁾。

本研究では粗度要素高さの2倍の高度における運動量のイジェクション（低速流塊の上昇流）の強さが時空間的にピークになる点を中心にアンサンブル平均を行う⁵⁾。まず平均運動量輸送の3倍（ $=\alpha$ ）以上の強さのイジェクションが生じている領域を抽出し、その前後左右で連続して抽出された領域の中で、運動量輸送が最大となる点を探査し、そこを中心としたアンサンブル平均を行った。閾値（ α ）については平均運動量輸送の1～5倍までの大ききで変化させたが、結果に大きな違いは出なかった。

3. 実験概要

(1) 観測概要

水平 $50 \times 100\text{m}$ のコンクリート平板と、512個の1辺 1.5m ($=H$) の立方体から構成される屋外都市模型（図-1, 2）において、超音波風速計と熱電対を用いた風速と温度変動の多点計測を行った。本サイトでは慣性層が高度 $3H \sim 2H$ 付近で発達しており、高度 $1.5H$ 以下は粗度境界層となっている¹¹⁾。

本観測は水平分布計測と鉛直分布計測からなる。水平分布計測（図-2b）では高度 $2H$ の y 方向一列に14台の超音波風速計（Kaijo DA600 $\times$ 8台、Young MODEL81000

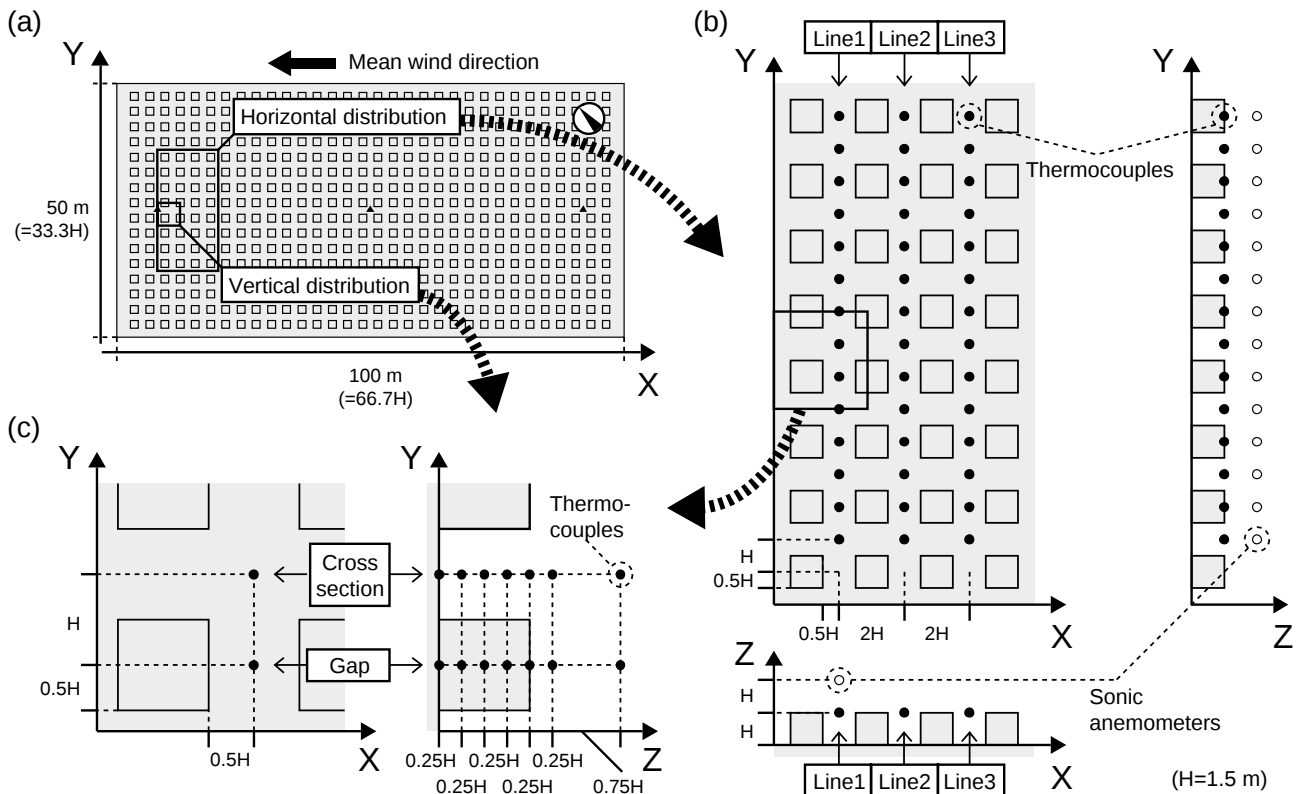


図-2 測器の配置 (a)屋外都市模型の全体図 (b)測器の配置（水平分布計測） (c)測器の配置（鉛直分布計測）

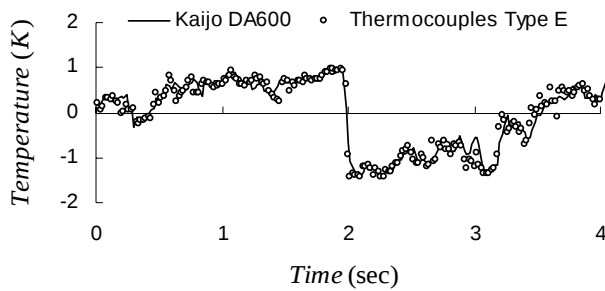


図-3 超音波風速計と熱電対で測定された温度変動

×6台)を配置した。また高度Hのブロック間に、熱電対42個をy方向3列 (Line1,2,3 図-2b参照) に配置した。鉛直分布計測 (図-2c) では、水平分布計測領域内のある一区画のブロック間 (Gap) と交差点 (Cross section) の2地点上で、高度2Hから地面近傍 (=0.01H) までの7高度に熱電対を鉛直一列に配置した。以上の水平・鉛直分布計測項目全てを50Hzで同期計測した。

(2) 異種ロガー間の同期

観測点数を多く確保するため、2種類のデータロガー (Campbell CR9000X、TEAC LX10) を用いた。両者の同期を取るために、LX10に接続された超音波風速計のプロブから約5 cm下方に、CR9000Xに接続した熱電対を配置し、両者が計測した温度変動の波形が合うように時間を修正することを試みた。

その際、熱電対の応答精度が超音波風速計と同等である必要がある。熱電対は熱慣性を持ち、実際の空気温度の変動に比べ応答が遅れる可能性があるが、これに対して廣岡ら⁵⁾は熱容量の小さな極細の熱電対素線 (Type-E, $\phi 0.025$ mm) を使うことで、超音波風速計で計測される温度変動とほぼ同等の応答性が得られることを確認しており、本研究でもこれを用いた。

結果、図-3に示すように、両者の変動値の波形は相関係数0.97でほぼ一致した。目方で少なくとも0.1秒の精度で同期できることを確認し、これによって50Hzで最大120chでの熱電対と超音波風速計の同期が可能となった。

(3) 解析データ

2009年8月下旬から9月上旬にかけて、約2週間の観測を行った。この期間で特に風向がy軸に対して垂直で、大気安定度が中立付近であった、2009年9月6日16時30分から同日17時までの30分間のデータを用いて解析を行った。大気安定度は以下の式より算出した。

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

ここで z' は有効高さ(m)を表わし、地表面からの高さ z (m) からゼロ面変位 d (m) を差し引いた値である。 L はオブコフ長(m)、 g は重力加速度(m s^{-2})、 k はカルマン定数で0.4とした。摩擦速度 u_* (m s^{-1}) は高度2Hにおける $-\overline{u'w'}$ の平方根より算出した。 $\overline{w'T'}$ は顕熱フラックス

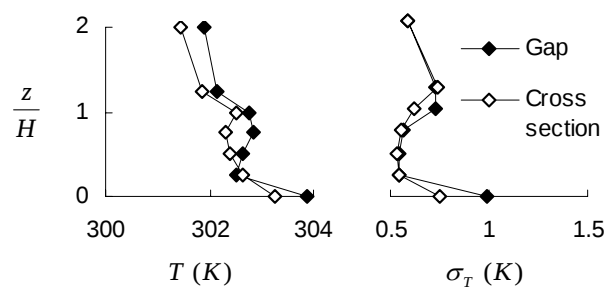


図-4 平均温度 $\bar{T}$ と温度の標準偏差 σ_T の鉛直分布

(K m s^{-1})である。解析期間の z'/L は0.05、平均風速は 2.15 m s^{-1} 、平均風向は南東よりで、x軸から北西側に25.3度傾いていた。

図-4にこの期間のGapとCross sectionでの高度2Hから地表面近傍までの平均温度 $\bar{T}$ (K)と温度変動の標準偏差 σ_T (K)を示す。平均温度は高度Hと地表面付近でピークを持ち、これらはそれぞれ日中暖められた屋根面と地表面からの熱供給に由来する¹²⁾。また、温度変動が屋根面レベルで最大になっているが、これは平均温度勾配が大きいことに加え、建物後流の強い乱流混合のためである。

4. 結果

(1) 慣性層で発達する乱流構造の影響

a) 各種乱流変動量の水平分布特性

図-5a-fはスパン方向の水平線上で観測された主流風速変動 u' 、鉛直風速変動 w' 、温度変動 T' の時空間 (水平) 分布を示している。高度2Hで観測された乱流変動の水平分布には高度2Hでの運動量輸送に直接寄与するアクティブな変動のみ抽出した結果となっている。まず高度2Hの u' 、 w' 、 T' の水平分布を見ると (図-5a,b,c)、低速領域が流れ方向に連なった筋状の組織構造が確認できる。稲垣ら⁶⁾の観測と同様、低速域では周囲に比べ温度が高く上昇流が存在している。つまりイジェクションによる運動量と熱の輸送が行われている。

次に同時刻に観測された高度Hでの T' の水平分布を見ると (図-5d,e,f)、高度2Hで見られた筋状構造とほぼ一致して、筋状に高温域が分布していることが分かった。さらにそれは流下方向に区画を隔てた3本の観測ライン (Line1,2,3 図-2b) 全てにおいて見られる。個々の建物の影響については、観測地点に依存した流下 (時間) 方向に直線的に伸びる細い直線状の分布として見られる。

これまでの粗度境界層に関する研究では、慣性層とは異なる、粗度要素の配列や形状から決定される乱流組織構造が発達し (例えばRaupachら¹³⁾)、それによって各種スカラーや運動量の交換がなされることが指摘されていたが、本観測結果より、個々の粗度要素に起因した乱流変動の影響に加え、それらより十分大きな、慣性層で発達する筋状の乱流構造が地表面付近の温度変動場の形成に影響していることが分かった。

b) 温度変動の鉛直分布特性

図-5g,hは他の図と同時刻に観測された、高度2Hから地表面近傍までの、GapとCross section (図2-c) 上の T'

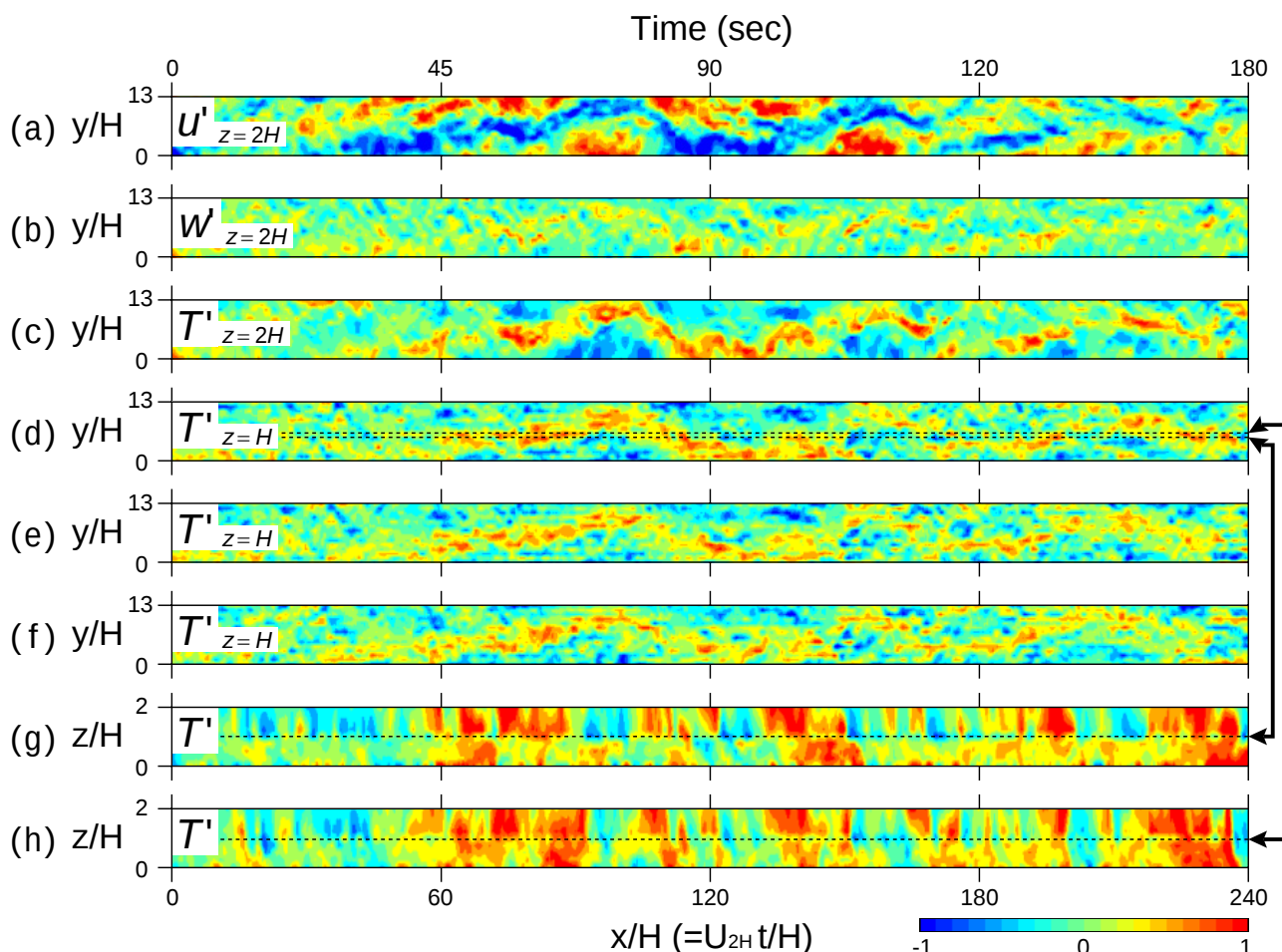


図-5 各種無次元乱流変動の水平・鉛直分布 (a),(b),(c)は高度2Hにおける u' , w' , T' の水平分布、(d),(e),(f)は高度HのLine1,2,3における T' の水平分布、(g),(h)はGapとCross sectionにおける T' の鉛直分布。各種乱流変動は各自の標準偏差で無次元化した。(d),(g),(h)の破線はそれぞれ空間的に同一の軸であることを示す。 U_{2H} は高度2Hでの平均風速、 t は時間。

の時間-鉛直分布を示している。筋状構造の通過に伴い、高度2Hから地表面近傍に至るまで、温度の上昇が確認できる。若干Gapでの高度Hを境に温度変動の不連続が見られるが、全体を見ると筋状構造の通過と、建物キャノピー以下の昇温が関連している。これは地面や壁面近傍で暖められた空気塊が筋状構造に沿って水平方向に収束し、上空へ発散しているためと考えられる。

c) アンサンブル平均した温度変動の水平・鉛直分布

以上の結果をより明確に示すため、風速と温度変動場の条件付アンサンブル平均を行った。高度2Hで強いイジェクションが生じている点を乱流構造のシグニチャとし、それを中心に周囲の風速と温度場を平均した。

図-6a,b,cは高度2Hにおけるイジェクション周りの u' , w' , T' の水平分布である。 u' 分布のみ水平風速ベクトルを重ねて描いた。図中の破線の交点でイジェクションの極大値が重なるよう流れ場を平均した。 u' と T' は筋状構造に対応し、流れ方向に長く伸びた構造を有しており、その中により小さな上昇流があることが分かる。風速ベクトルを見ると、高度2Hではイジェクションに向かって収束が起こっている。

図-6dは高度Hでアンサンブル平均した T' の水平分布であり、2Hと同様に中心で温度が高く、2Hの構造との相関が確認できる。図-7は鉛直断面において同様の手法

でアンサンブル平均したものである。Cross sectionでは温度の上昇域が上空2Hから地表面近傍までほぼ連続した形で存在しているのに対し、Gapでは高度0.75H付近を境に高温域の不連続性が見られる。つまり、Cross sectionについては昇温を伴った鉛直流が建物高さ以下の層まで連続していると考えられ、Gapでは鉛直流が建物高さ付近で流れが分断されていることが示唆される。Gapでは建物境界によって制限されたキャビティ渦が存在し、そのため上空の流れ場との不連続性が出たものと考えられる。

d) 温度スペクトルの鉛直分布特性

GapとCross sectionの各高度における温度変動のスペクトルから、キャノピー層の温度変動場に及ぼす、慣性層の乱流構造と、粗度要素が作る局所的な乱流変動の相対的な影響について検討する。

図-8は各地点、各高度で観測された温度スペクトルである。日変化に起因した低周波トレンドを除去してある。横軸は生の周波数であり、無次元化をしていない。その理由は先ほどの T' の水平分布で見た通り、慣性層における筋状の乱流構造に起因した温度変動の時空間分布は高度2HとHでほぼ一致することによる。つまりその時空間スケールは高度に依らずほぼ一定であり、各高度で観

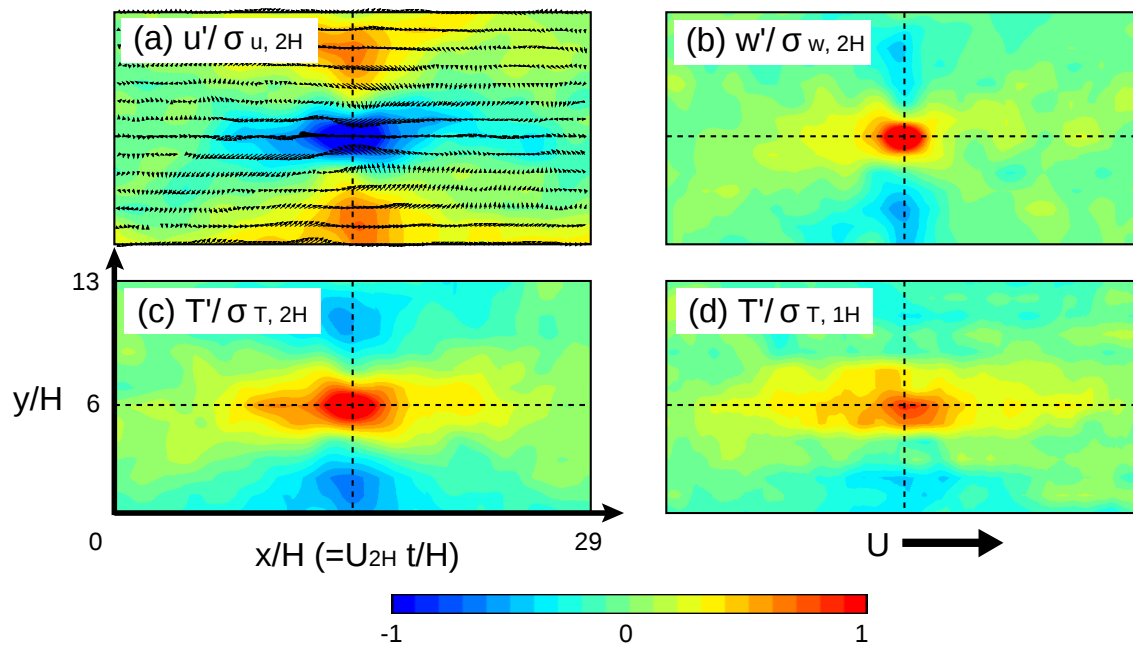


図-6 条件付アンサンブル平均した高度2Hの(a) u' , (b) w' , (c) T' と高度Hの(d) T' の水平分布 値は各標準偏差で無次元化した

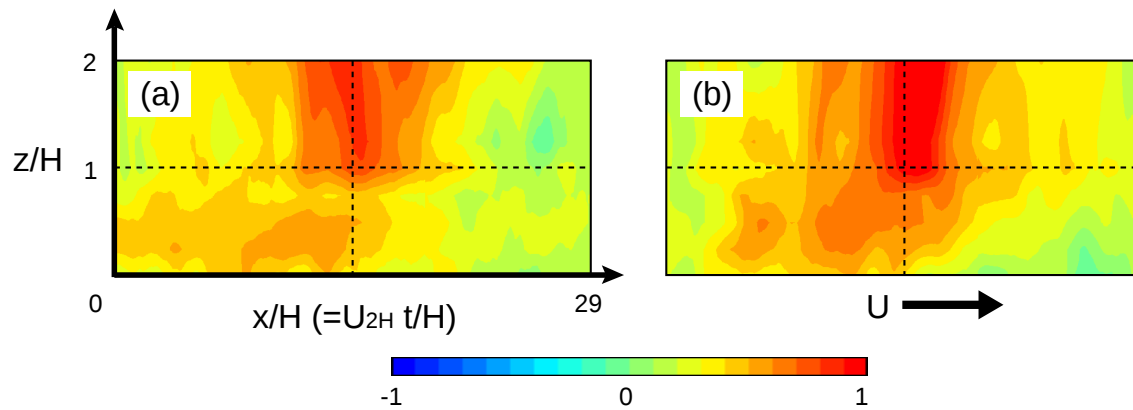


図-7 条件付アンサンブル平均した(a) Gap, (b) Cross sectionにおける T' の時空間鉛直分布 値は各標準偏差で無次元化した

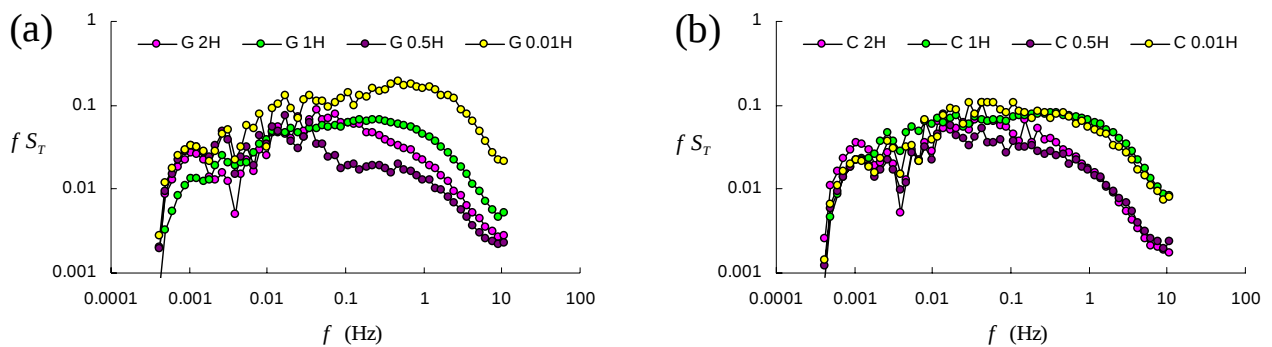


図-8 温度変動スペクトルの鉛直分布 (a) Gap, (b) Cross section

測されたスペクトルを生周波数上でプロットすれば、各高度での乱流構造の影響が同周波数帯で比較できる。

まず高度2Hの温度スペクトル形状に着目する。この温度スペクトルは超音波風速計で測定されたもので、空間フィルタによりインアクティブな低周波成分の影響が除去されており、慣性層起因の温度変動となっている⁴⁾。そのピークは周波数0.1～0.01Hz付近に現れており、つまりこの周波数帯が慣性層起因の乱流変動の影響に対応し、

定性的には筋状構造の影響によるものと考えられる。

これを踏まえて下層のスペクトル形状を見ると、GapとCross sectionの高度0.5Hではともに慣性層スケールの変動が卓越しており、高度Hと0.01Hではそれより高周波の、局所的な粗度要素の影響が強いことが分かる。

(2) インアクティブな低周波変動の影響

図-9は空間フィルタにより抽出された、高度2Hにお

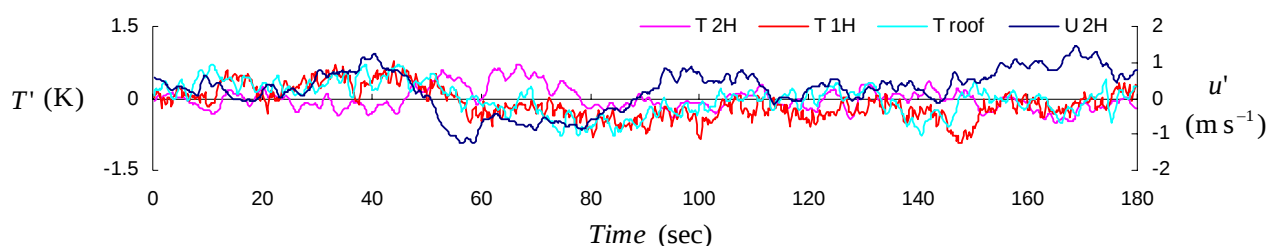


図-9 風速と温度変動の低周波成分 T 2H, U 2Hは高度2Hの温度と風速変動、T 1Hは高度Hの温度変動、T roofは屋根面中央の温度

ける u' と T' の低周波成分と、高度Hにおける T' の低周波成分である。高度Hの T' の低周波成分はブロック背後の観測点（全21点）の空間平均から見積もった。さらに、建物模型の屋根面温度に2秒間の移動平均を加えたものを載せる。丸山ら⁴⁾が示すとおり、2Hにおける u' の低周波成分は正味の熱・運動量輸送をもたらさないインアクティブな変動であり、先に示した筋状構造に代表されるアクティブな変動との根本的な違いは鉛直風速変動を伴わない点である。慣性層でのインアクティブな u' の低周波変動がキャノピー層の T' に与える影響を検討した。

図-9を見ると、各波形に約1分周期の低周波変動が確認できる。始めの80秒間に着目すると、高度Hの T' と高度2Hの u' の低周波成分は正の相関が見られ、一方高度2Hの T' と u' は負の相関を持つことが確認できる。これは、風速が速い場合に建物近傍では壁面と大気間の顕熱輸送が促進され温度が上がり、より高い高度では慣性層内での混合が盛んで、速い風速はSweep（高速の下降流）に対応し、温度が相対的に減少したと考えられる。

しかしながら、図の後半では高度Hと2Hの T' に正の相関があり、どちらも2Hの u' と逆相関である。図-9の屋根面温度を見ると、これと高度Hの T' は全時間帯で比較的相関が高い。屋根面温度は対流熱伝達の他に放射による熱供給を受けて温度が変動するため、一概に風速だけの議論は難しく、更なる検討及び観測が必要である。

5. 結論

本研究は屋外都市模型における乱流計測と、キャノピー層における熱電対を用いた温度変動の多点計測により、都市キャノピー層における温度変動の形成要因について検討を行い以下の結論を得た。

慣性層では筋状の乱流組織構造が発達し、その影響がキャノピー層の温度変動場に対して直接的に影響を及ぼしていることが分かった。個々の建物の数倍の大きさを持った組織構造の通過に対応し、建物区画スケールに依存しない、温度変動場が形成されていることが分かった。さらに温度変動の鉛直分布観測により、その影響が地表面近傍まで及んでいることが分かった。

低周波の温度変動については高周波変動の限りではなく、乱流現象の他に放射過程やシノプティックな要素など、より包括的な検討が必要であることが示唆される。

謝辞：本研究は科学研究費補助金 若手研究（B）（課題番号:21760382）による支援を受けた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Oke, T. R.: *Boundary Layer Climate*, Routledge, 1978.
- 2) Eliasson, I., Offerle, B., Grimmond, C. S. B. and Lindqvist, S.: Wind fields and turbulence statistics in an urban street canyon. *Atmos. Environ.*, Vol.40, pp.1-16, 2006.
- 3) Kanda, M.: Large eddy simulations on the effects of surface geometry of building arrays on turbulent organized structures. *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol.118, pp.151-168, 2006.
- 4) 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巻, pp.253-258, 2008.
- 5) 廣岡智, 稲垣厚至, 神田学: 乱流組織構造の抽出法に関する検討, 土木学会水工学論文集, 51巻, pp.241-246, 2007.
- 6) 稲垣厚至, 神田学, 森脇亮: 屋外都市スケールモデルで観測された乱流組織構造に関する考察, 水工学論文集, 50巻, pp.445-450, 2006.
- 7) 瀧本浩史, 佐藤 歩, 小野村史穂, 神田 学: PIVを用いた乱流計測 - 屋外模型都市と室内模型都市の相互比較 -, 水工学論文集, 53巻, pp.241-246, 2009.
- 8) 佐藤 歩, 瀧本浩史, 道岡武信, 神田 学: 建物キャニオン内の気流と拡散に関する屋外都市スケールモデル実験, 水工学論文集, 53巻, pp.247-252, 2009.
- 9) Townsend, A. A.: *The structure of turbulent shear flow*. Cambridge University Press, 1976.
- 10) Watanabe, T.: Large-Eddy Simulation of coherent turbulence structures associated with scalar ramps over plant canopies. *Boundary-Layer Meteorol.* Vol.112, pp.307-341, 2004.
- 11) Inagaki, A. and Kanda, M.: Turbulent flow similarity over an array of cubes in near-neutrally stratified atmospheric flow. *J. Fluid Mech.*, Vol.615, pp.101-120, 2007.
- 12) Kawai, T., Kanda, M., Narita, K. and Hagishima, A.: Validation of a numerical model for urban energy-exchange using outdoor scale-model measurements. *Int. J. Climatol.*, Vol.27, pp.1931-1942, 2007.
- 13) Raupach, M., Finnigan, J. J., Brunet, Y.: Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: The mixing-layer analogy, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol.78, pp.351-382, 1996.

（2009.9.30受付）