

機関番号：12608

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760382

研究課題名 (和文) 大気乱流の複層構造を考慮した都市キャノピー流れの解明

研究課題名 (英文) Study on multi-scale structures of turbulence in urban canopy layer

研究代表者

稲垣 厚至 (INAGAKI ATSUSHI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：80515180

研究成果の概要 (和文)：

本研究では屋外都市模型における熱電対と超音波風速計を用いた温度と風速変動の多点同期計測を行い、建物キャノピー層における乱流変動の時空間分布特性について検討した。これにより、キャノピー層の乱流場は近傍の建物の影響だけでなく、上空の接地境界層で発達する、建物の数十倍以上の大きさを持った乱流組織構造及び、それよりさらに数オーダー大きな大気境界層スケールの乱流変動の影響を受けていることを明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：

Spatial distribution of turbulence within a cubical canopy was observed in the outdoor reduced urban scale model experiment using multi-number of thermocouples and sonic anemometers. It revealed that the turbulence field in cubical canopy was affected by turbulent structures developed above the canopy layer, which is much larger than the size of individual cubes.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2010年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：都市大気境界層・キャノピー乱流・乱流の複層構造・都市の熱拡散・乱流構造

## 1. 研究開始当初の背景

本研究は都市の建物高さ以下の層として定義される、都市キャノピー層の乱流現象の理解を目的とし、それを通じて建物キャノピーにおける熱や物質のベンチレーションの物理過程について検討するものである。

都市大気境界層は、上空1000m程度まで発達する混合層、10～100m程度の水平一様な慣性層(対数層)、それ以下の地表面粗度の直接的影響が及ぶ粗度境界層、の3層から構成

されており、粗度境界層の中にキャノピー層が含まれる。これまでの都市大気境界層の研究では主に各層について個別の取り扱いがされており、これら3層を包括的に取り扱った研究は少なく、各層間の相互作用について多く理解されていない。

## 2. 研究の目的

そこで本研究は、屋外都市模型における温度と風速の多点同期計測を行い、上記に挙げ

た都市大気境界層を構成する3つの層が、都市キャノピー層の流れ場や温度場にどのような影響を及ぼしているのか検討を行った。その際特に、乱流変動の水平分布構造と、その周波数特性に着目した検討を行った。

### 3. 研究の方法

屋外都市模型において、複数の超音波風速計と熱電対を用いた温度と風速変動の高周波・多点同期計測を行った。屋外都市模型及び、測器の設置の様子を図1に示す。

熱電対の配置については以下の2通りを行った。まず一つ目として、熱電対を屋外都市模型のキャノピー層内3高度にそれぞれ水平一列に並べた。熱電対の数は一列当り14点とし、建物模型の13倍の長さの間に等間隔で並べた。超音波風速計も同様に、接地境界層内の1高度(建物模型の2倍の高さ)に、横一列に並べた。図2に測器の設置の概略図を示す。また別な観測期間に、熱電対14点を1セットとして、建物模型の1倍の高度に3列水平に配置した。図3に概略を示す。

接地境界層で発達する乱流構造の空間分布特性については、テイラーの凍結仮説を仮定することで、上記の観測から水平面分布を推定した。混合層スケール(数km)の乱流変動については本都市模型の大きさ(50m x 100m)に対して十分大きいと考え、接地境界層における同一高度の観測値を空間平均することでその時間変動のみ見積った。以上の変動がキャノピー層の温度、速度変動にどのような影響を及ぼすか検討を行った。

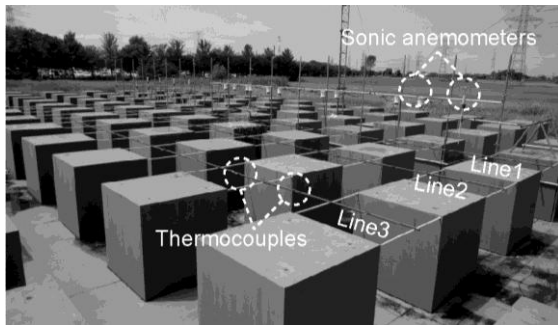


図1 屋外都市模型 (COSMO)  
図中の Line1-3 に熱電対が配置されている

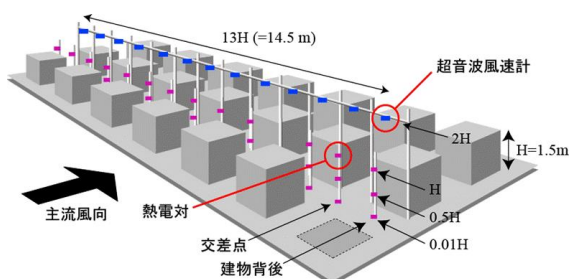


図2 測器の設置 (鉛直分布観測)

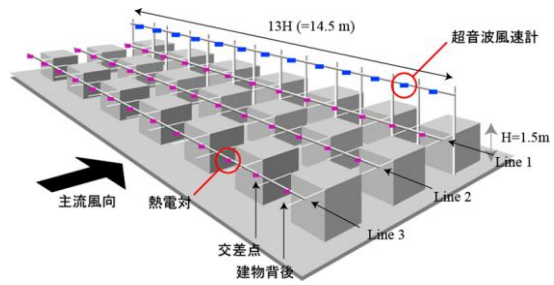


図3 測器の設置 (流れ方向分布観測)

### 4. 研究成果

#### (1) 温度変動の空間分布

得られた成果として、慣性層では筋状の乱流組織構造が発達し、それ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すことが分かった。図4は建物模型の高さの2倍、1倍、0.5倍、0.01倍の高度で計測された温度変動の時空間分布である。建物模型の2倍の高さでは高温域が筋状の構造を形成していることが確認でき、それに追従してキャノピー内の温度も変化していることが確認できる。図の縦方向の距離は個々の建物模型の13倍の幅を持つが、キャノピー層内の温度変動分布が個々の建物模型より大きな空間構造を形成し、蛇行していることが分かる。さらに、水平風速が上空とキャノピー内の地面近傍では大きく異なるにも関わらず、図に見られる組織構造が上空とほぼ同一時刻に観測されていることから、キャノピー内に見られる組織構造の移流速度は、地面近傍の平均風速より大きいものと推測される。

これまでの観測から、建物高さの2倍の高度で見られる筋状構造は低速の筋状構造と対応していること、収束域であり、上昇流域と対応していることが明らかにされているが、それらが下層の地表面付近まで及んでいることを、屋外大気環境下での実験により明らかにした点が本研究の成果である。

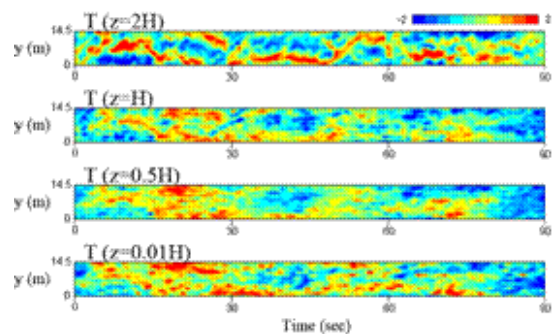


図4 温度変動の時空間分布 測定高度は上から建物模型の2倍、1倍、0.5倍、0.01倍の高度となっている

## (2) 条件抽出

不規則な乱流変動からある特徴的な構造を条件抽出し、それらをアンサンブル平均することで乱流構造特性を検討する手法がある。本研究では大きな熱輸送をもたらすようなイベントの空間構造に着目するため、高度 2H (建物高さの2倍の高度) で顕熱輸送の時系列から、それぞれの平均値の2倍以上の大きさを持った瞬間的な輸送イベントを抽出し、そのピークが中心に来るように乱流場の条件付きアンサンブル平均を行った。その際に、上空から下方への輸送と、下方から上空への輸送を区別し、また、建物背後と交差点の鉛直断面についても区別した。

図5はアンサンブル平均された温度変動の鉛直-時間分布を示している。まず建物背後と交差点の違いとして、交差点では地表面付近まで上空の温度変動との相関が強いことが示されている。これについてさらに輸送方向の違いについて見ると、上方から下方への輸送が行われている時の方が、上空との相関がより長い時間に渡って続いていることが確認された。つまり本屋外都市模型のような建物が正方配列されたような場では、上空からの熱や運動量輸送は建物背後ではなく、主流方向と平行に走っている通りにおいて行われていることを示唆している。これについて同様の結果は数値解析においても得られている。

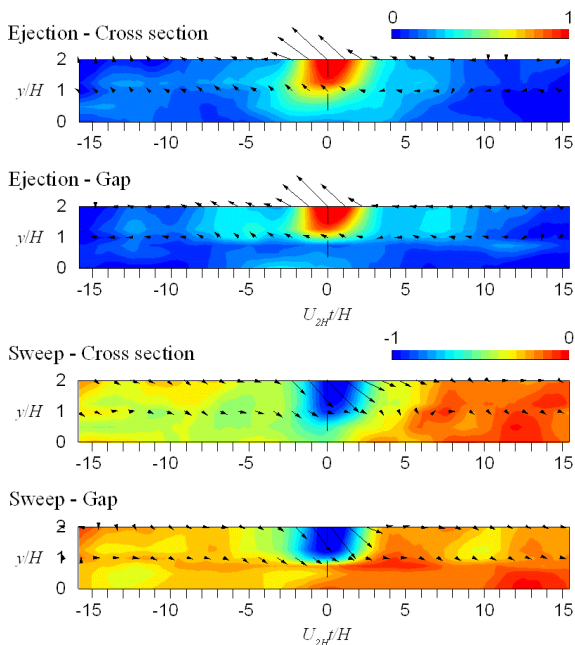


図5 条件付きアンサンブル平均された温度の鉛直-時間分布

図の違いは場所 (Gap, Cross section) と熱の輸送方向 (Ejection, Sweep) の違いを表している。矢印は建物模型の2倍と1倍の高さの風速ベクトルを示す

## (3) 周波数特性

図6は各高度別にアンサンブル平均した温度変動スペクトルである。横軸はそれぞれの測定高度に依存しない、建物高さと高度 2H での平均風速を用いて無次元化されている。図の破線は建物模型高さの2倍の高度で観測されたものであり、周波数 0.03 付近と 0.1 付近に強い変曲点を持っている。低周波側のもは混合層スケールの周波数特性であることが知られており、同一周波数帯のピークが下層のスペクトル形状にも見られることから、混合層スケールの変動が下層まで及んでいることが示唆される。また、高周波側の変曲点は接地境界層に見られる筋状構造に対応したものであるが、この周波数帯についても下層でピークを持つことが確認できる。

以上より、混合層と接地境界層で発達する乱流構造がキャノピー層の温度変動や流れに強く影響していることが分かった。

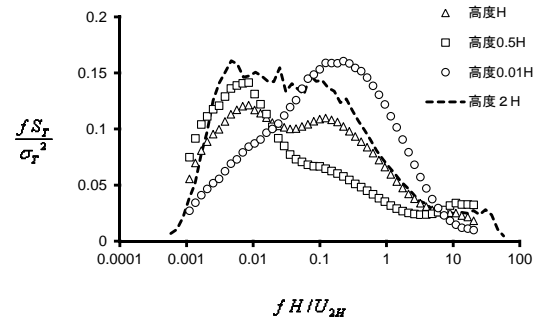


図6 温度変動スペクトルの高度変化

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① Nottrott, A., Onomura, S., Inagaki, A., Kanda, M., Kleissl, J.: Convective heat transfer on leeward building walls in an urban environment: Measurements in an outdoor scale model. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 54, 3128-3138, 2011. 査読有
- ② Takimoto, H., Sato, A., Barlow, J. F., Moriwaki, R., Inagaki, A., Onomura, S., Kanda, M.: Particle Image Velocimetry Measurements of Turbulent Flow Within Outdoor and Indoor Urban Scale Models and Flushing Motions in Urban Canopy Layers, *Boundary-Layer Meteorol.*, 1-20 (online first), DOI:10.1007/s10546-011-9612-6, 2011. 査読有
- ③ 小野村史穂, 服部康男, 稲垣厚至, 瀧本

浩史, 神田学: 建物の鉛直壁面に発達する熱境界層の実測, 土木学会水工学論文集, 55, 337-342, 2011. 査読有

- ④ Inagaki A., and Kanda M.: Organized structure of active turbulence over an array of cubes within the logarithmic layer of atmospheric flow. *Boundary-Layer Meteorology*, 135, 209-228, 2010. 査読有
- ⑤ 稲垣厚至、萩島理、成田健一、神田学: 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, 土木学会水工学論文集, 54, 307-312, 2010. 査読有
- ⑥ 山下佳美・稲垣厚至・Marieta Cristina L. CASTILLO・瀧本浩史・神田学: 都市キャノピー層内の乱流特性 -上空の乱流組織構造の影響-, 土木学会水工学論文集, 54, 283-288, 2010. 査読有

[学会発表] (計7件)

- ① Inagaki, A. and Kanda, M.: Active Turbulence over an outdoor reduced urban scale model, Ninth Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, 1-6 August 2010, Keystone, CO, USA.
- ② Inagaki, A., Castillo, M. C. L., Yamashita, Y. and Kanda, M.: Numerical simulation of atmospheric turbulence within and above a cubical canopy, Ninth Symposium on the Urban Environment, American Meteorological Society, 1-6 August 2010, Keystone, CO, USA.
- ③ 稲垣厚至, 萩島理, 成田健一, 神田学: 屋外都市模型のキャノピー層における温度変動の空間分布, 日本気象学会 2010年度春季大会, 2010.5.23-26, 東京
- ④ Castillo M.C.L., Zhang J., Kanda M., Letzel M.O., Inagaki A.: Coherent structures of a neutrally stratified urban boundary layer using large eddy simulation, 7th symposium of international conference of urban climate, A7-5 (4 pages), 30 June 2009, Yokohama, Japan.
- ⑤ Inagaki, A., Maruyama A. and Kanda, M.: Spatial and temporal scales of coherent turbulence over outdoor

reduced urban scale model, 7th symposium of international conference of urban climate, P2-12 (4 pages), 30 June 2009, Yokohama, Japan.

- ⑥ Inagaki, A., and Kanda, M.: Structure of active turbulence over outdoor reduced urban scale model, 7th symposium of international conference of urban climate, A3-4 (4 pages), 29 June 2009, Yokohama, Japan.
- ⑦ 稲垣厚至, 神田学: 接地境界層における組織乱流の平均構造, 日本気象学会 2009年度春季大会, 2009.5.28, つくば

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

稲垣 厚至 (INAGAKI ATSUSHI)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号: 80515180