

不安定条件下の屋外都市キャノピー層における気温 の時空間分布計測による乱流構造の把握

萩島, 理
九州大学大学院総合理工学研究院

成田, 健一
日本工業大学工学部建築学科

谷本, 潤
九州大学大学院総合理工学研究院

<https://hdl.handle.net/2324/26597>

出版情報：日本建築学会環境系論文集．75（656），pp.877-883，2010-10-01．日本建築学会
バージョン：
権利関係：(C) 2010 日本建築学会



不安定条件下の屋外都市キャノピー層における
気温の時空間分布計測による乱流構造の把握INVESTIGATION ON TURBULENT CHARACTERISTICS WITHIN URBAN CANOPY LAYER
BASED ON OUTDOOR EXPERIMENT USING FINE WIRE THERMOCOUPLES

萩島 理*, 成田 健一**, 谷本 潤***

Aya HAGISHIMA, Ken-ichi NARITA and Jun TANIMOTO

The authors performed a field measurement on the turbulent characteristics of an urban canopy layer over a cubical array using numerous fine thermocouples and nine ultra sonic anemometers. The time and spatially fluctuations of air temperature were discussed comparing the instantaneous velocity under the unstable condition. The result clearly showed that the passage of the microfront of temperature above the canopy, which are correlate the sweep and ejection motions due to a turbulent organized structure (TOS) developed within an inertial sublayer, in contrast, the temperature fluctuation below the canopy height is less sensitive to the TOB.

Keywords: Urban Canopy, Field Measurement, visualization, spectrum analysis

都市キャノピー, 屋外実測, 可視化, スペクトル解析

1. 緒言

都市キャノピー層の乱流性状は、汚染物質の拡散、街路の熱環境、都市域の風通し、建物の自然通風など様々な問題に大きな影響を与えるため、その特性把握やモデル化は重要な課題である。都市キャノピー層の気流場や温度場は、建物群による凹凸の作り出す大小様々な渦や剥離、日向と日影の混在による表面温度の不均一性（例えば Offerle et al. (2007)¹⁾, 萩島ら(2007)²⁾）によって強い3次元分布を有していることが広く知られている。そのため都市キャノピー層における観測データはキャノピー内のローカルな分布の影響を受けやすく、全体像を把握することが困難になる傾向がある。それを回避するためには多点計測により時空間平均データを取得することが望ましいが、コストや通過交通といった制約条件のため実現は難しい。これに対し近年では Direct Numerical Simulation (DNS)³⁾ や Large-Eddy Simulation (LES)⁴⁾ による計算結果を3次元キャノピーの速度場に関する時空間高解像度データベースとして活用し、流れ場、とくに乱流の構造について考察する研究も行われている。その大半は等温の中立条件を対象としたもので、壁面が加熱もしくは冷却される条件において DNS による解析⁵⁾ の例もあるが、大規模な乱流組織構造を捉えられるような大きな計算領域を取ることは現時点で

は困難が伴う。また、粗面近傍のごく薄い層における分子拡散による熱伝導現象を解像する必要があるため、LES による解析には課題も多い⁶⁾。また、上空と地表付近の間での熱や水蒸気などのスカラー輸送は、乱流の組織構造と密接に関連した大規模渦による間欠的なイベントによる寄与が大きいことが指摘されているが、こうした非定常の乱流組織構造を表現し得ない Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) モデルによる解析にも限界がある。

こうした背景から、放射の不均一による温度むらや自然風の影響を受けた条件でのデータ取得が可能な屋外観測の重要性は依然として高い。これまでにキャノピー内外の乱流統計量のプロファイルの相似則等について多くの観測が行われてきた⁷⁾。また、キャノピー高さ以下の領域についての観測も近年各地で行われている。例えば、Oikawa and Meng (1995)⁸⁾ は市街地のキャノピー内外の乱流統計量の測定を行うとともに、乱流組織構造と温度場の非定常な挙動が関連していることを明らかにしている。また、Eliaison et al. (2005)⁹⁾ は市街地のキャノピー内の速度や温度の平均場についての観測を行っている。キャノピー内の乱流統計量についても Cristian et al. (2008)¹⁰⁾ は、街路中央のタワーにおいて2地点の鉛直プロファイルのデータを長期に渡り取得し、風向別にアンサンブル平均した後全 16

* 九州大学大学院総合理工学研究院 准教授・博士(工学)

Assoc. Prof., Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu Univ., Dr. Eng.

** 日本工業大学工学部建築学科 教授・工博

Prof., Department of Engineering, Nippon Institute of Technology, Dr. Eng.

*** 九州大学大学院総合理工学研究院 教授・工博

Prof., Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu Univ., Dr. Eng.

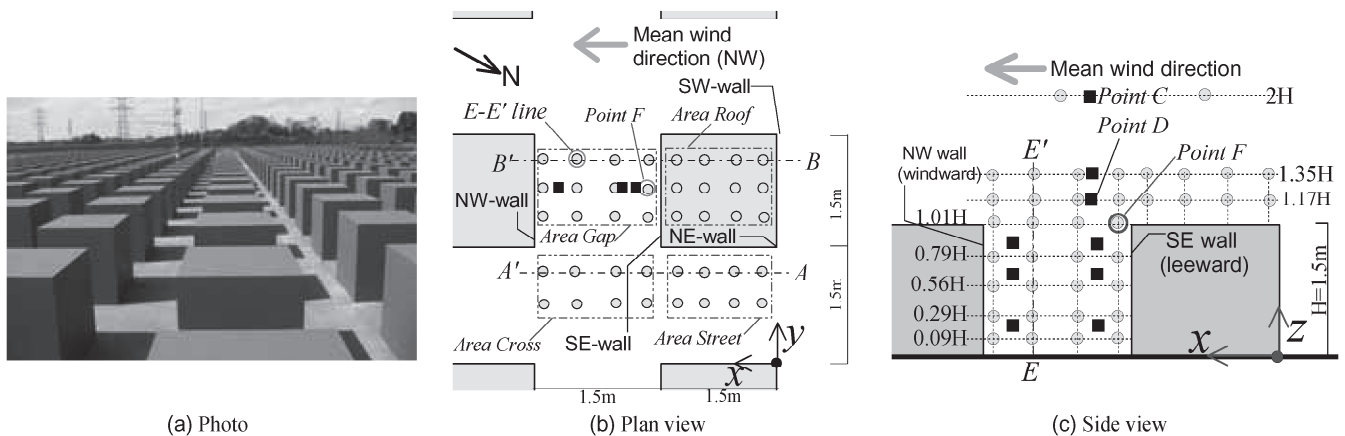


Fig. 1 Measured area. The black square and gray circle refer a measurement position of ultrasonic anemometer and thermocouple, respectively.

方位での平均を取ることにより空間平均の乱流統計量のプロファイルを推定している。

こうした市街地における観測は、上空大気の流れの影響下でのデータが取得できる点で、風洞実験には無い大きなメリットはあるが、一方で、観測地点周辺の街区形状の局所的な影響など解析を難しくする要素もある。そこで、風洞実験と屋外観測の双方の利点を併せ持つアプローチとして、屋外における縮小模型実験も近年、目覚ましい成果をあげている¹¹⁾。

例えば、埼玉に設置された準実大都市模型 COSMO (Comprehensive Outdoor Scale Model experiment for urban climate)は、50m×100m のコンクリートスラブ上に 1/5 スケールの住戸を模擬した 1.5m のコンクリート立方体が等間隔に規則的に配置された観測サイトで、通常の市街地観測で問題になるような歩行者や通過交通は無い上、キャノピーサイズが小さいため、センサをキャノピー層内の任意の場所に設置することが容易である。また、風洞実験では再現できない、放射による不均一な表面温度分布や上空大気の大規模な乱流の影響を受けた条件下での観測ができることも魅力である。これまでに COSMO では放射、顕熱フラックス、潜熱フラックスなどの熱収支各成分に加え、キャノピー層内外の乱流統計量の観測が行われおり、都市キャノピー層のモデリングのための重要な知見が多く報告されている^{12) 13) 14) ほか}。

加えて、COSMO のキャノピー内外の詳細な気流分布特性に関しては、瀧本らは夜間の静穏な気流条件におけるキャノピー内流れを PIV により観測している¹⁵⁾。また、佐藤らは超音波風速計による速度場の観測および物質拡散の実験を行っている¹⁶⁾。稲垣らは細線熱電対を広範囲に配置することで大規模な乱流組織構造を抽出するとともに、キャノピー上空気流の四象限解析を行っている¹⁷⁾。

これに対して本研究は、COSMO のキャノピー層内部における気流・温度の 3 次元的空间分布の非定常変動を多点計測により把握しようというものである。COSMO はキャノピーサイズは 1.5m と小さいため、多数の測器を配置することによる気流への影響を抑えるためにはセンササイズを小さくする必要がある。加えて屋外の乱流計測において一般的に使われている 5cm スパン程度の小型超音波風速計は非常にコストが高く、3 次元メッシュ状の多点観測は困難である。こうした問題を考慮して筆者らは、安価で応答性が高くセンササイズが小さいという細線熱電対の特性に着目し、これを 3 次元メッシュ状に配置することで、キャノピー層の非定常な 3 次元的温度

場の計測を行った。これは空気温度を気流のトレーサーと見立てた乱流場の可視化の試みと位置づけられる。本報では、キャノピー内の温度分布の不均一性が強くなる不安定条件の解析結果について報告を行う。

2. 観測概要

2.1. 観測サイトおよび測定機器

準実大都市模型 COSMO は埼玉県宮代町(36° 01' N, 139° 42' E)に位置し、50m×100m のコンクリートスラブ上にサイズ 1.5m(以下、1.5m を基準長さとして H と表記)の中空のコンクリート立方体 512 個が 1.5m 間隔 ($H/W = 1$, 建蔽率 $\lambda_p = 0.25$) で整形配置されている。COSMO の概観を Fig. 1(a)に示す。COSMO の詳細については Kanda et al. (2005)¹²⁾ を参照されたい。

このサイト中心付近の 1 街区に注目し立方体 1 個の周辺の 3 次元的气温分布の計測を行った。測定点の配置状況を Fig. 1(b) および Fig. 1(c)に示す。ヒタイプ細線熱電対 (ϕ 0.05mm) を用いて地上高さ 14cm (0.09H) から 202cm (1.35H) までの 7 高度について各 28~40 点、加えて 300cm (2H) の高さにて 3 点の合計 223 点にて空気温度の測定を行っている。主風向と平行な鉛直断面内では超音波風速温度計 (KAJO DA600, TR90-AH) を 9 地点に設置し、風速 3 成分と温度の計測を行っている。熱電対および超音波風速計のデータは同一のデータロガー (チノー KE3000) に接続し、10Hz で同期して収録される。

なお、以降の説明において、立方体周辺を 4 つのエリアに分類し、主風向に平行な街路で立方体に挟まれた領域を *street*、交差点部分を *cross*、主風向に直角な街路で風上と風下を立方体に挟まれた領域を *gap*、立方体の上空を *roof* とする。また、COSMO サイトにおいて別の期間にレイノルズ応力などの乱流統計量の鉛直プロファイルを観測した Inagaki らによると、高さ 2H は概ねフラックス一定と見なせる慣性底層に含まれていることが確認されている¹⁸⁾。

温度および風速の高周波測定に加えて、気象条件としてサイト中央の高さ 3H にて精密短波放射計 (英弘精機 MR40) にて下向き、上向きの長波長放射量・短波長放射量、熱電対によりコンクリート立方体と床の表面温度を計測している。観測期間は 2008 年の 11 月 1 日から 12 月 12 日の約 1 ヶ月間である。観測期間中の主風向は街路とほぼ平行の北西風である。そこで本稿では、この主風向を x 軸、スパン方向を y 軸、鉛直上向きを z 軸とし、対応する速度成分を $u, v,$

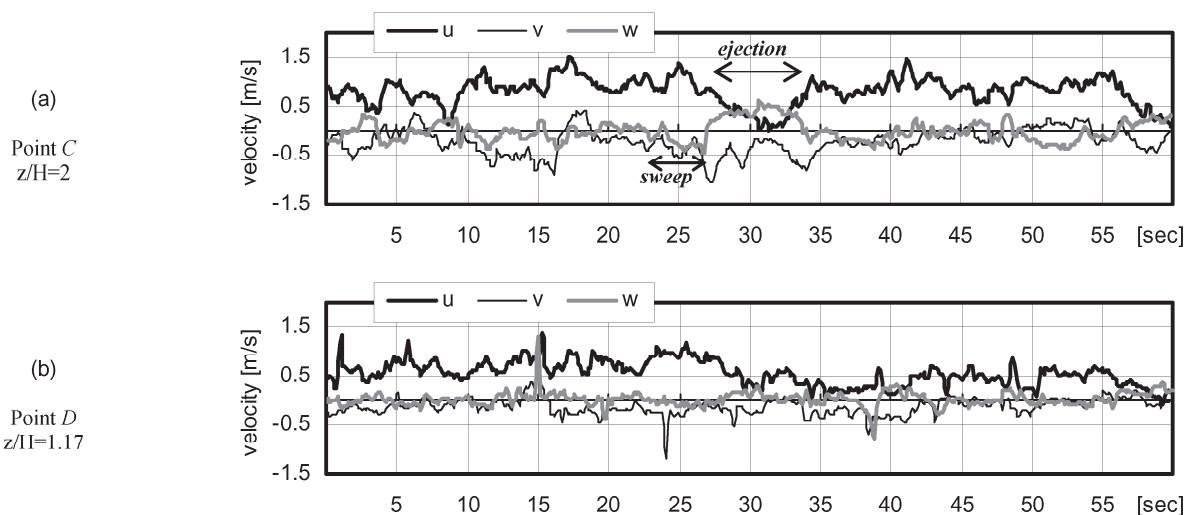


Fig. 2 Instantaneous velocity components obtained above a cubical array under unstable condition ($z/L = -0.82$) using a ultra sonic anemometer.

w とする。

2.2. 解析対象データの選別

まず筆者らは、全観測期間のデータに対して平均化時間 30 分での統計量（平均、標準偏差、分散、歪度、尖度）を算出した上で、以下の条件を満たす解析対象データとして 389 サンプルを抽出した。即ち、1) 主風向が街路と平行な北西風に対し ± 15 度の範囲内である、2) 223 点の空気温度計測値の欠測が 5 点未満である、3) 日降水量がゼロである、という 3 条件である。なお、温度の歪度の絶対値が 10 を超える場合は、温度の時系列生データにスパイク状のノイズを含むとみなし欠測として取り扱っている。

次に、温度時系列データによる乱流挙動の可視化という目的に鑑みて、抽出されたデータの中でも 2H における乱流統計量に基づく安定度パラメータ z/L が -0.82 で負に最大となる不安定条件の 2008 年 12 月 11 日 13:30~14:00 を選び、解析対象とした。なおこの時間帯は高さ 2H における 30 分平均風速は 0.80m/s と弱風で、正味放射量 64W/m^2 、全天日射量 154W/m^2 、高さ 2H における顕熱フラックス 42W/m^2 、高さ 1.35H における空間平均気温は 15°C である。また、コンクリート立方体の日向壁面（SE 壁、SW 壁）が空気温度に対して約 $5\sim 8^\circ\text{C}$ 高いのに対し、日影壁面および地面の表面温度は気温とほぼ同じ値であった。なお、センサの不調のため屋根表面温度は計測できなかったが、COSMO サイトにおける過去 2 年間の同じ季節の快晴日の表面温度分布のデータから、屋根表面温度は日向壁面温度とほぼ同じ値であったことが推察できる。

3. 時空間温度変動

解析対象として選定した 30 分間の中でも主風向が COSMO サイトの長辺方向に平行な北西風で特に安定していた 13:31 から 13:32 間の 60 秒間について、10Hz 生データを使い、時空間変動についての考察を行う。この時間帯の 2H 高さの C 点と 1.17H 高さの D 点における 3 成分流速の時変動を Fig.2 に示す。また、Fig.3 に同じ 60 秒間における測線 A-A' と測線 B-B' 上の空気温度の時空間変動を示す。Fig.3 の横軸は時刻、縦軸は x 方向距離で原点から上に離れるほど風下を意味し、色は線上の測定点の空気温度各々の 60 秒間平均値

に対する偏差である。よって、Fig.3 に見られる右斜め上への筋状のピークは、風上で観測された温度変動が風下の地点で遅れて観測されたこと、即ち、温度のマイクロフロントが通過したことを意味していることになる。平均流に対して乱れが小さいキャノピー上空については、テイラーの凍結乱流仮説により横軸の情報は主流方向の空間軸とみなすこともできる。

測線 A-A' 上の 1.01H, 1.17H, 1.35H の温度変動 (Fig.3e, 3f, 3g) において複数の右斜め上へのストリークがほぼ同じ時刻に出現しており、0.79H (Fig.3d) ではこのストリークが不鮮明となる。また、測定高度が高くなるほどストリークは急勾配となっている。これは、COSMO と同じ配列条件（整形、 $\lambda_p = 25\%$ ）を対象とした DNS の結果を報告した Cocco et al. (2006)³⁾ の指摘するとおり、主風向と平行な街路では channel 流れに近い均一な流れとなっているため、キャノピーの上半分以上の領域では乱流組織構造がその形を大きくは変えずに通過していったと考えられる。また、ストリークの勾配が上空ほど大きくなるのは、流速が上空ほど早いことと対応したものである。一方、0.56H 以下では 0.79H 以上で観測されるストリークと類似のパターンは殆ど見いだせない。これは次のような現象を意味すると考えられる。即ち、不安定条件においては、主風向と平行な街路において channel 流れに近い比較的均一な流れにより上空の乱流組織構造が進入し、キャノピー高さ近傍まではその構造を維持している。しかし、キャノピー内部では local な加熱と渦などの影響が強くなるのに対して平均流は小さいため組織構造が温度変動に及ぼす影響は徐々に小さくなる。

23 秒から 27 秒の時間帯には、高さ 1H 以上の測線 A-A' と B-B' の両方において負の鋭いピークが観測される。これは、高さ 2H の C 点で観測された高速下降 ($u' > 0, w' < 0$) のいわゆる sweep イベント (Fig.2a) により上空の冷気が地表付近に導入されたためと考えられる。温度のマイクロフロントが測線 A-A', B-B' の両方で出現していることから、この組織構造のスパン方向の大きさは少なくともキャノピーサイズ H と同程度かそれより大きいことが推測される。稲垣ら¹⁷⁾ が明らかにした COSMO 上空の慣性底層で発達するストリーク構造は幅 $3H\sim 6H$ であり、本研究のデータと矛盾しない。また、sweep イベントの直後には連続して約 10 秒の間 $u' < 0, w' > 0$ となる

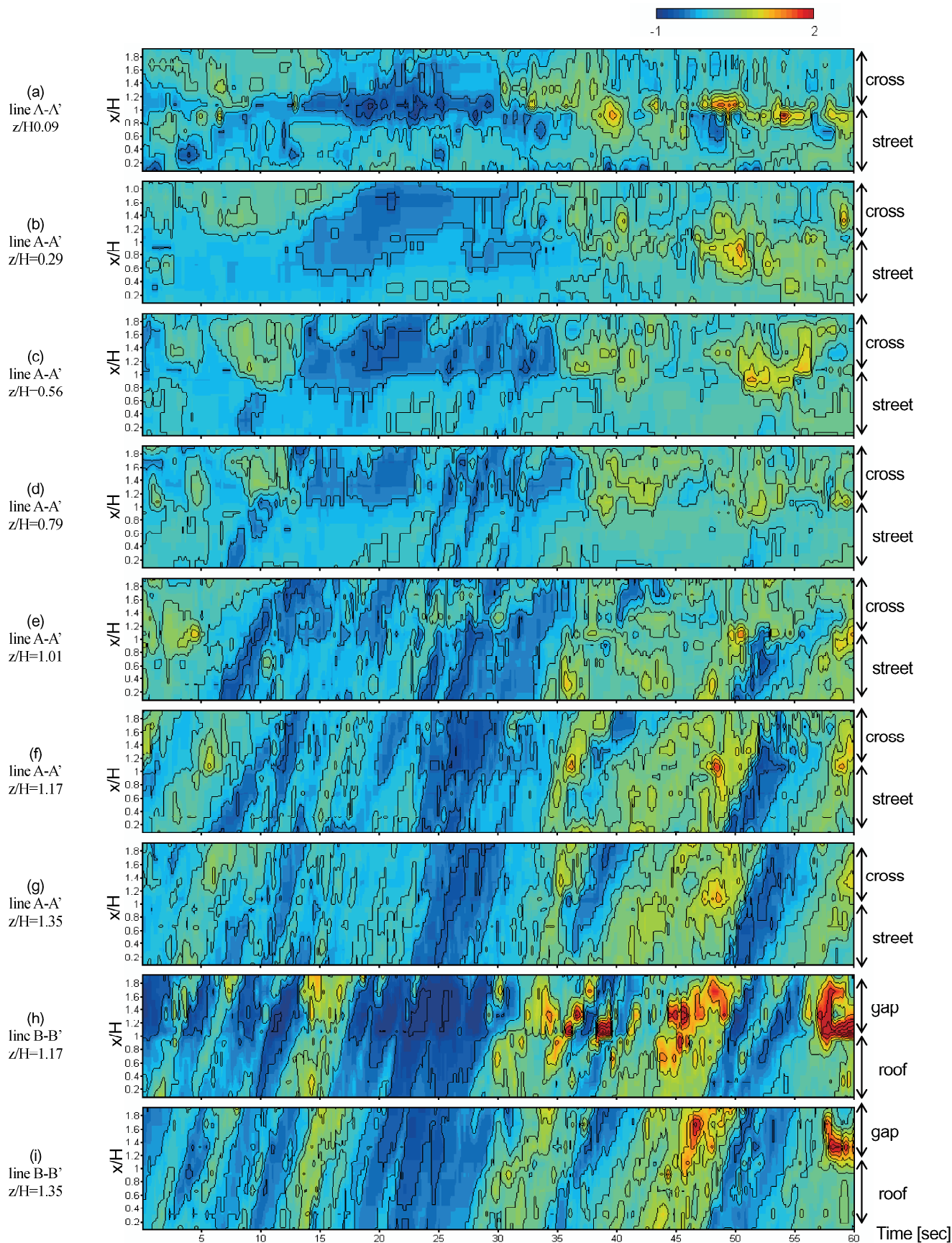


Fig. 3 Temperature fluctuation measured in the lines A-A' and B-B' shown in Fig. 1. The horizontal and vertical axes refer the time and position coordinate of mean direction scaled by the cube height x/H , respectively. The fluctuation of temperature shown on colour bar is subtracted from time-averaged values of each measurement points in the 60 seconds.

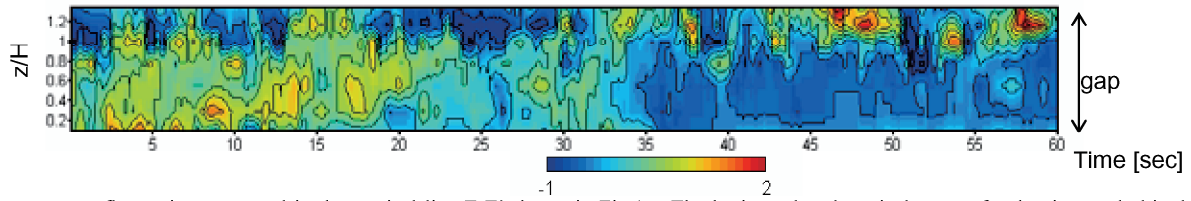


Fig. 4 Temperature fluctuation measured in the vertical line E-E' shown in Fig.1. The horizontal and vertical axes refer the time and altitude scaled by the cube height z/H , respectively. The fluctuation of temperature shown on colour bar is subtracted from time-averaged values of each measurement points for a period of 60 seconds.

低速上昇の ejection 現象が見られる。こうした温度のマイクロフロントと ejection, sweep 現象の対応は、BUBBLE プロジェクトのタワーデータを解析した Cristen et al. (2007)¹⁰⁾ と類似したものと考えられる。

Fig.3h と Fig.3i ($z=1.17H, 1.35H$) に示された測線 B-B' 上の温度変動は、15 秒後から小さなプラスのピークが見られる。加えて、同じ時間帯に D 点においてスパイク上の上昇流が観測されている。1.17H 高さにおける正のストリークが同じ時間帯の 1.35H におけるそれより小さく鋭く、また僅かに早い時刻で出現している、同時刻に同様のストリークが側線 A-A' では見られない、という 2 点から、この非常に鋭いプラスのピークは、模型群上空で発達する大規模な組織構造ではなく、加熱された屋根による小さなサーマルの影響であると推察される。

測線 B-B' の高さ 1.17H (Fig.3h) では、35 秒後に gap 領域 ($y=1H$ から $y=2H$ の間) において強い正のストリークが観測されている。この暖かい空気塊は、leeward となる SE 壁付近の複雑な剥離や渦に日向の壁面(SW 壁, SE 壁)と屋根面近傍で生成されたサーマルが巻き込まれた結果だと推測される。

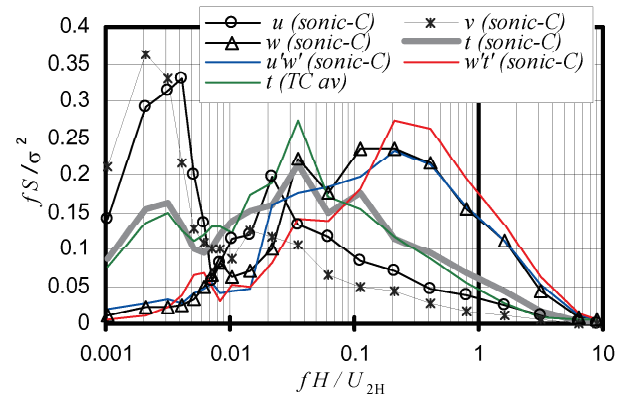


Fig.5 Pre-multiplied spectra obtained at 2H (point C) in COSMO under unstable condition ($z/L = -0.82$) using a ultra sonic anemometer, plotted on semi-log axis. An averaged spectrum obtained at 2H using three fine wire thermocouples (referred as 'TC av') is also plotted as a reference.

次に、gap 領域に位置する鉛直の側線 E-E'における温度の時空間変動を Fig.4 に示す。グラフに示した 60 秒間、常に温度パターンはキャノピー高さを境界にしてその上空と下部で大きく異なる傾向を示している。前半の時間帯は、キャビティ内部が高温、キャビティ

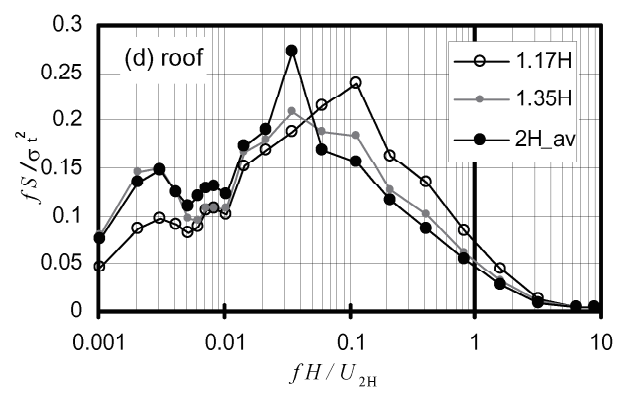
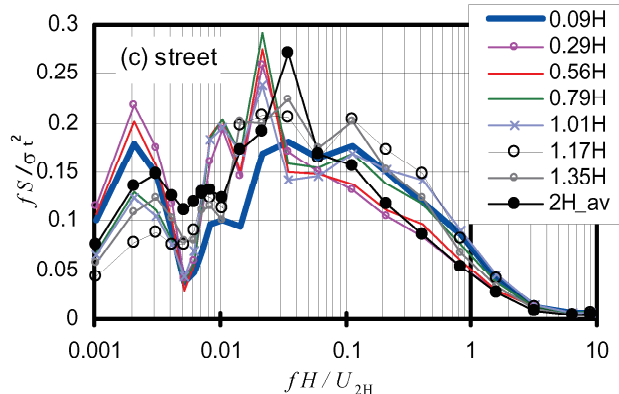
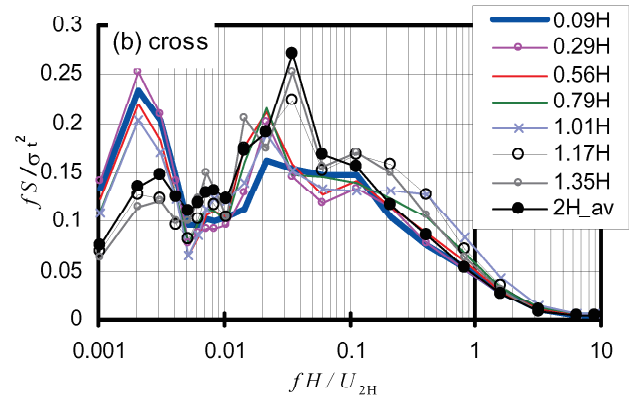
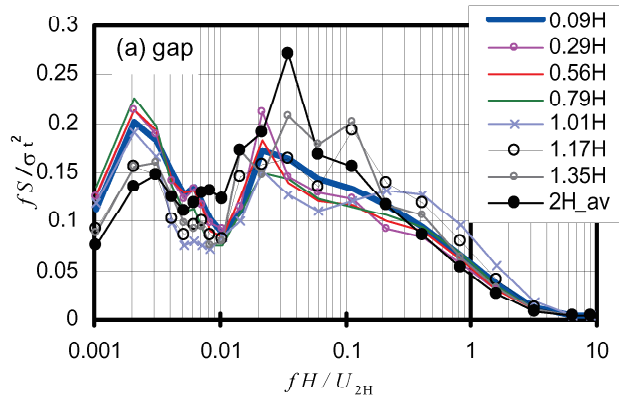


Fig.6 Pre-multiplied spectrum of air temperature obtained at each height in COSMO using fine wire thermocouples, plotted on semi-log axes, (a) area gap, (b) area cross, (c) area street, and (d) area roof. An averaged spectrum obtained at 2H using three fine wire thermocouples (referred as '2H_av') is also plotted as a reference.

上空は低温であるのに対し、後半の時間帯は変動の正負が逆転している。しかし、キャノピー上空の速度変動パターン (Fig.2) には、こうした約 30 秒の時間スケールでのキャノピー内外での温度変動の直接的な原因と思われるような傾向は見られない。

また、測線 A-A', B-B' の屋根高さより上の測定点を 23 秒から 28 秒頃に通過した冷気塊 (Fig.3e ~ Fig.3i) に対応して、Fig.4 では屋根高さ以上の領域で負のピークが出現しているのに対して同じ時間帯のキャノピー内気温は低下しておらず、慣性底層で発達した組織構造が立方体風下のウェイクとなるキャビティ内の温度を変化させるには至っていないことを示している。加えて、45 秒後から、Fig.4 では高さ 1.01H において間欠的なプラスのピークがみられるが、これは Fig.3h, 3i で見られたプラスのピークとも対応しているものである。

4. 温度のスペクトル

2.2 節で解析対象として選定した不安定条件の 30 分間 (2008 年 12 月 11 日 13:30~14:00) の時系列生データについて、FFT によるスペクトルを考察する。高さ 2H の C 点における流速 3 成分、温度、レイノルズ応力、顕熱フラックスのスペクトルを Fig.5 に、細線熱電対による温度のスペクトルを Fig.6 にそれぞれ示す。なお、温度及び流速のスペクトルは 30 分間の線形トレンドを除去している。細線熱電対のデータについては Fig.1 (b) に示す 4 つのエリア street、cross、gap、roof に分類し、高さ 0.09H から 1.35H までエリア内の全測定点を高さ別に平均している。細線熱電対が 3 点設置された高さ 2H についてはこの 3 点を平均している。また、横軸の周波数は立方体サイズ H (1.5m) と 2H 高さにおける流速のスカラ値で無次元化周波数で表示している。

高さ 2H におけるスペクトルに関しては、水平速度成分 u , v では低周波側 (無次元化周波数 0.002~0.004, 実時間で十数分のオーダー) にピークを有しているのに対し、鉛直速度 w のスペクトルはレイノルズ応力や顕熱フラックスと同様に無次元化周波数 0.1 (実時間で十数秒程度) オーダーにピークを示している。このことから、COSMO における中立時のキャノピー内外のスペクトルを検討した稲垣ら^{18), 19) 20)} が指摘するように、 w のスペクトルピークは運動量輸送と熱輸送に寄与する慣性底層の時間スケールの active な変動と対応しているのに対して、水平速度成分 u , v は混合層の時間スケールと対応した低周波の inactive な変動と対応していることが確認できる。

細線熱電対と超音波風速温度計による温度スペクトルは測定地点が同一で無いことを考えると概ね両者は一致していると判断できよう。またスペクトルは二つのピークを有し、温度変動が混合層と慣性底層という二つの異なる時間スケールの乱れの影響を受けていることが分かる。

次に、Fig.6 のキャノピー内外温度スペクトルを見ると、gap、cross、street の 3 つの領域のいずれも、混合層の時間スケールに対応して低周波数側 (無次元化周波数 0.002~0.003 付近, 実時間 10~15 分程度) にピークを有している。特に、キャノピー高さ以下の測定点では混合層の時間スケールの渦の寄与が 2H 高さのスペクトルに比べ大きく、慣性底層の時間スケールの渦の寄与は相対的にやや小さくなっている。一方で、主風向と平行な street 部の 0.79H では低周波

側の寄与は 2H 高さのそれと同様に小さく、むしろ慣性底層スケールの渦の影響が卓越している。キャノピー上部に比べキャノピー底部の方が慣性底層スケールの寄与が小さいという傾向を Fig.3 に示した温度の時空間変動パターンと照合すると、以下のように解釈できる。即ち、不安定条件では、主風向と平行な街路のキャノピー高さ付近より上空では慣性底層で発達する組織構造に起因する ejection や sweep により温度のマイクロフロントが十数秒オーダーの周期で通過しているのに対して、キャノピー内部の床付近では、床面や壁面などの局所加熱のためか、慣性底層で発達する乱流組織構造による温度変動の影響を受けにくい、というものである。

cross (交差点部) の地面付近 (0.09H, 0.29H) で低周波側のピークが特に鋭いのは、天空に大きく開けた幾何形状のため上空の大気乱流の影響を受けやすくなるためであろう。また、roof 部の 1.17H のスペクトルが 2H のそれに比べ高周波数側の寄与が若干大きくなっているのは、屋根表面のシアアの影響を受けた可能性が考えられる。

5. 結語

立方体整形配列の屋外都市キャノピー層内外において細線熱電対という比較的安価で小型のセンサを用いた多点同時計測により、気温をトレーサーとした乱流構造の可視化を試みることを第一の目的として、弱風晴天の不安定条件に絞った解析を行った。その結果、不安定条件における気温の時空間変動特性について以下の知見を得た。即ち、慣性底層において発達するストリーク構造に対応してキャノピー高さ付近より上空において、温度のマイクロフロントが出現するのに対し、キャノピー高さ以下の温度変動は、こうしたストリーク構造の通過の影響を受けにくい。また、キャノピー内部の温度スペクトルは、慣性底層におけるそれと比較すると、高周波数の変動の寄与が小さく、混合層の時間スケールである低周波変動の寄与が大きくなる。特に交差点部分の床付近ではその傾向が強い。

今後は、引き続き大気安定度が中立や安定の場合の解析を行うとともに、キャノピーを構成する凹凸各部の表面と大気対流熱輸送効率と周辺乱流特性との関係を解明することを目的として、この手法を活用してキャノピー表面のごく近傍における温度変動特性の計測を行う予定である。

謝辞

本研究の観測は木村友人氏の多大なる労苦により遂行された。また、スペクトル解析については東京工業大学 稲垣厚至先生より貴重な助言を頂いた。本研究の一部は文部省科学研究費 基盤研究(B) 複雑都市キャノピーがもたらす熱・空気力学フォーシング効果の解明とモデル化 (代表 谷本潤) に拠る。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Offerle B, Eliasson I, Grimmond C S B, and Holmer B, Surface heating in relation to air temperature, wind and turbulence in an urban street canyon, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 122, pp.273-292, 2007
- 2) 萩島理, 成田健一, 菅原広史, 谷本潤: 実大スケール都市キャノピーの表面对流熱伝達率分布に関する観測, 日本建築学会環境系論文集 73 巻, 626 号, pp.511-518, 2008.4.
- 3) Coceal O, Thomas TG, Castro IP, Belcher SE, Mean flow and turbulence statistics over groups of urban-like cubical obstacles. *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 121, pp. 491-519, 2006

- 4) 例えば Kanda M, Large-eddy simulations on the effects of surface geometry of building arrays on turbulent organized structures. *Boundary-Layer Meteorology*, vol.118, pp. 151–168, 2006
- 5) 例えば Kawamura F, Seki Y, Iwamoto K, Kawamura H, DNS of heat transfer in turbulent and transitional channel flow obstructed by rectangular prisms, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 28, pp.1291–1301, 2007
- 6) 例えば Cai X-M, Barlow JF and Belcher SE, Dispersion and transfer of passive scalars in and above street canyons—Large-eddy simulations, *Atmospheric Environment* Vol. 42(23), pp. 5885–5895, 2008.
- 7) 例えば Roth M, Review of atmospheric turbulence over cities, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 126, pp. 941–990, 2000
- 8) Oikawa S and Meng Y, Turbulence characteristics and organized motion in a suburban roughness sublayer, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 74(3), pp. 289–312, 1995
- 9) Eliasson I, Offèrle B, Grimmond CSB, Lindqvist S, Wind fields and turbulence statistics in an urban street canyon. *Atmospheric Environment* vol.40, pp.1–16, 2005
- 10) Christen A, Gorsel E V, and Vogt R, Coherent structures in urban roughness sublayer turbulence, *International Journal of Climatology*, vol. 27, pp.1955–1968, 2007
- 11) Kanda M, Progress in the scale modeling of urban climate: Review, *Theoretical Applied Climatology*, vol. 84, pp.23–33, 2006
- 12) Kanda M, Kawai T, Kanega M, Moriwaki R, Narita K, and Hagishima A, Simple energy balance model for regular building arrays, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 116, pp. 423–443, 2005
- 13) Kawai T, Kanda M, Narita K and Hagishima A, Validation of a numerical model for urban energy-exchange using outdoor scale-model measurements, *International Journal of Climatology*, vol.27, pp.1931–1942, 2007
- 14) Kanda M, Kanega M, Kawai T, Moriwaki R, Sugawara H. Roughness lengths for momentum and heat derived from outdoor urban scale models. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* vol.46, pp. 1067–1079, 2007
- 15) 瀧本浩史, 森脇亮, 津國眞明, 神田学: 屋外都市スケールモデルにおける PIV 計測, *水工学論文集*, 第 52 巻, pp. 259–264, 2008.
- 16) 佐藤歩, 瀧本浩史, 道岡武信, 神田学: 建物キャニオン内の流れ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*, 第 53 巻, pp.247–252, 2009.
- 17) 稲垣厚至, 神田学, 森脇亮: 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, *水工学論文集*, 第 50 巻, pp. 445–450, 2006.
- 18) Inagaki A and Kanda M, Turbulent flow similarity over an array of cubes in near-neutrally stratified atmospheric flow, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 615, pp. 101–120, 2008.
- 19) 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, *気象学会 2010 年春季大会講演予稿集* p.152, 2010.5.
- 20) Inagaki A, Kanda M, Organized Structure of Active Turbulence Over an Array of Cubes within the Logarithmic Layer of Atmospheric Flow, *Boundary-Layer Meteorology*, vol.135, pp.209–228, 2010.5.

(2010年5月8日原稿受理, 2010年6月29日採用決定)