

乱流組織構造の抽出法に関する検討

A METHOD OF IDENTIFICATION OF THE TURBULENT ORGANIZED STRUCTURE

廣岡智¹・稲垣厚至²・神田学³

Satoshi HIROOKA, Atsushi INAGAKI and Manabu KANDA

¹学生会員 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8852 東京都目黒区大岡山2-12-1)

²学生会員 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 理工学研究科国際開発工学専攻 (同上)

Turbulent organized structure (TOS) above urban canopies has not been clarified. In order to investigate it, we observed the horizontal distribution of TOS at COSMO (Comprehensive Outdoor Scale Model experiment for urban climate). The horizontal dimension of COSMO was 50m x 100m, with 1.5m cubic roughness blocks arranged uniformly. 60 thermo couples and 8 sonic anemometers were arranged.

A new quantitative analysis to characterize the size of TOS has been conducted by using OSIM (Organized Structure Identification Method). OSIM detects the area of large turbulent motion and quantified the span-wise width and the time duration of the motion. In this study, we explained the algorithm of OSIM and applied it to COSMO data.

Key Words : *turbulent organized structure, outdoor urban scale model, horizontal distribution, OSIM, COSMO*

1. 序論

都市域における熱・水・物質の輸送過程には都市の幾何構造によって生み出された乱流構造が重要な役割を持つ。そのため、この乱流構造の把握は必要不可欠である。

著者らは自然条件下での乱流構造を明らかにするべく、スケールモデルCOSMO(Comprehensive Outdoor Scale Model experiment for urban climate, 図-1)で乱流構造の研究を行っている。例えば、稲垣ら¹⁾はスケールモデルCOSMO上での筋状の構造を確認し、それらが接地層における大半の乱流輸送を担っていることを指摘している。しかしながら、都市キャノピー上に発達する乱流構造のスケールや形状といった特徴は未だ明らかになっておらず、透過性を有する植生キャノピー乱流との類似性が指摘される一方で、平板乱流の特徴を有することも指摘されている。Adrianら²⁾は平板滑面上の乱流構造の概念図を提唱しているが、都市域においてはこのような概念図の提唱には至っていない。

これまでの大気乱流構造に対する解析手法としては、Meng and Oikawa³⁾らは実都市での観測において四象限解析に基づいた鉛直一次元でのランプ構造抽出を行い、また、LESを用いた数値解析では、Watanabe⁴⁾がウェーブレット解析による条件抽出に基づきアンサンブル平均さ

れた乱流構造について検討を行っている。これらの手法は風洞実験、鉛直一次元方向での現地観測や数値計算を対象とした乱流構造のアンサンブル解析であり、Adrianら²⁾が示したような乱流構造の持つ形状がかき消されてしまう弱点もある。

そこで本研究では乱流組織構造の時空間スケールを抽出する新しい画像解析による構造抽出法を試みた。以下、この方法をOSIM(Organized Structure Identification Method)と呼ぶことにする。この手法では乱流構造を一つ一つ抽出することにより、個々の構造の持つ形状やスケールを残したままでの解析を行うことができる。この手法を自然条件下のスケールモデルCOSMOで行っている複数の超音波風速計・熱電対を用いた大規模高解像度の乱流組織構造の水平分布観測のデータに適用し、乱流構造の解析を試みた。



図-1 COSMO外観

2. COSMOにおける大規模熱電対観測実験概要

(1) COSMO概要

日本工業大学（埼玉県南埼玉郡宮代町学園台4-1）の敷地内に100m×50mのコンクリート基盤を設け、その上に建物に見立てた一辺1.5m（=H）のコンクリート立方体を規則的に512個（32個×16個）、建蔽率0.25で配列した（図-2(a)）。冬季は北西の風、夏季は南東の風が卓越する。（詳細は稲垣ら¹⁾を参照されたい。）

(2) 気温の水平分布計測

COSMO上における冬季の卓越風向に対し、図-2(a)枠に示した位置に熱電対を0.75m間隔で水平方向に60点配置した（図-2(b),(c)）。計測高度は3m(=2H)である。観測に使用した熱電対はTypeE極細熱電対（クロメル-コンスタンタン $\phi=0.05\text{mm}$ ）である。データはチノー社のKE3000に収録した。なお、TypeE熱電対の基準点補償精度は0.5度以下である。

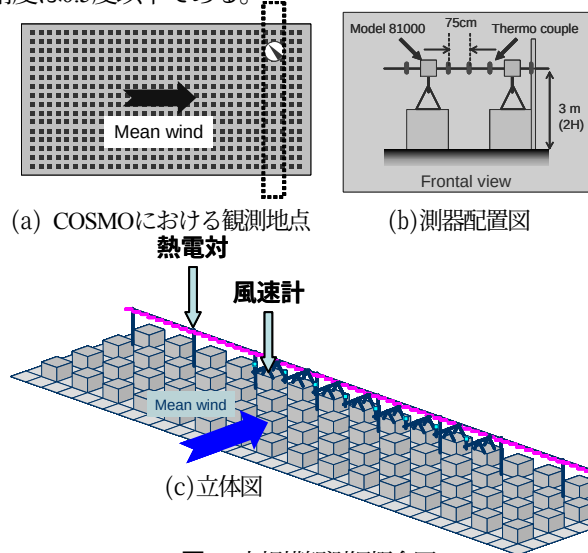


図-2 大規模観測網概念図

(3) 風速の水平分布

観測に使用した風速計はYoungの81000Modelで熱電対の観測網と同様の位置に高度3m(=2H)に3m間隔で8台風速計を並べた。（図-2(b),(c)）熱電対と同様にチノーKE3000を用い10Hzで同期測定を行った。

(4) 観測概況及び解析手法

冬季は冬型の気圧配置により風向が安定するため、冬季に観測を行い、2005年12月19日14:11から16:27の約2時間のデータを取得した。この時の風速のデータは以下のようであり、北西の風が卓越し、風速は 4m s^{-1} 以上の強い風が吹いている（図-3）。図-3では冬季の卓越風を風向0度としている。風速計で得られた速度成分（ u, v, w ）温度 T 及び熱電対で得られた温度 T の10Hzデータから一分平均値を算出し、瞬間値からの残差を求めた。なお、稲垣ら¹⁾を参考にし、大規模乱流構造の解析には一分間で平均値を取るのが適切と考えた。

(5) 解析結果一例

図-4(a)に熱電対による一分間の温度変動値 T' 、図-4(b)に風速計による温度変動 T' 、図-4(c)に風速計による水平速度変動値 u' を示す。この図で横軸は時間軸であり、縦軸はスパン方向の位置を表す。それぞれ筋状の乱流構造が確認できる（図-4中黒丸枠）。風速計による観測領域は図-4(a)内の赤枠で囲われた領域に対応しており、風速計による温度変動と熱電対による温度変動はよく対応している。また正の温度変動は低速領域、負の温度変動は高速領域に対応している。

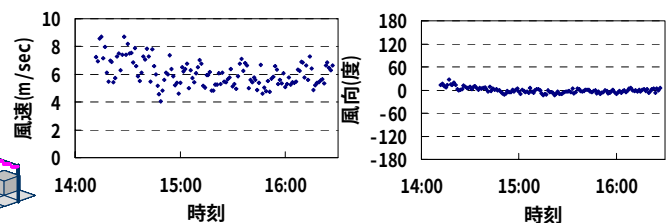


図-3 対象時間内の風向・風速（左：風速、右：風向）

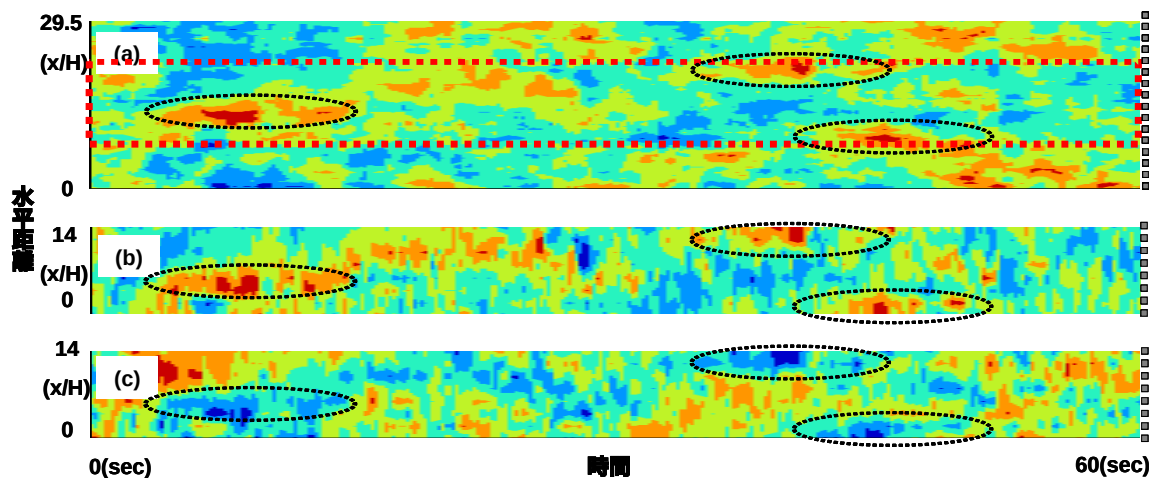


図-4 各種変動量の水平・時系列分布

高度:2H 時刻:14時12分 平均風速 6.87m s^{-1} コンター範囲: $T' -0.7\sim0.7(\text{K})$ $u' -6\sim6\text{m s}^{-1}$
 (a)熱電対による温度変動 (b)風速計による温度変動 (c)風速計による水平風速変動

3. 構造抽出手法

前章で示したコンター図による可視化は乱流構造の定性的把握に留まり、定量的な把握は困難である。そこで、本観測の特徴の一つである「高解像度での観測」という点を活かし、定量的な把握に向けた「OSIM（乱流構造抽出法）」のアルゴリズムについて紹介する。時空間的に連続した温度変動を持つ領域を構造として認識し、各々の構造における水平方向の代表幅及び時間方向の代表持続時間を算出する。このアルゴリズムは大きく分けて図-5のような三つで構成される。

Step1. 閾値による構造の選別



Step2. クラスター化



Step3. 個々の構造の特性把握

図-5 OSIMのアルゴリズムの流れ

ステップ1. ～閾値による構造の選別～

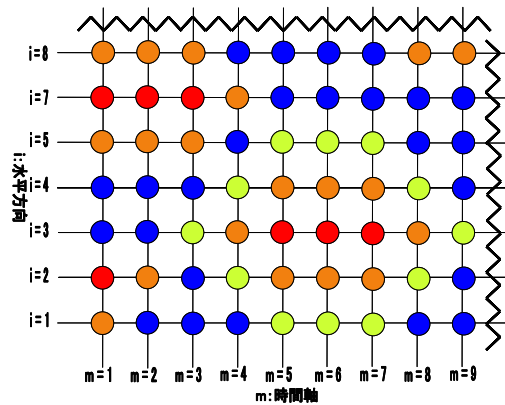
まず図-4と同様に、水平・時間座標上の時間平均値からの温度変動値を算出する。模式図（図-6）は時間座標 $m=1\sim9$ 、水平座標 $i=1\sim8$ の領域を示しており、図-6(a) は各座標のもつ温度変動値を色分けしたものである。青～黄緑～オレンジ～赤の順で変動値が大きくなるとする。今、オレンジ及び赤が閾値を越えている点であり、青及び黄緑は閾値を越えていない点とし、両者を識別する（図-6(b)参照）。

ステップ2. ～クラスター化～

閾値以上の点が座標上で縦・横・斜め方向に連続していた場合、それらの点の集合を一つの構造と考える。

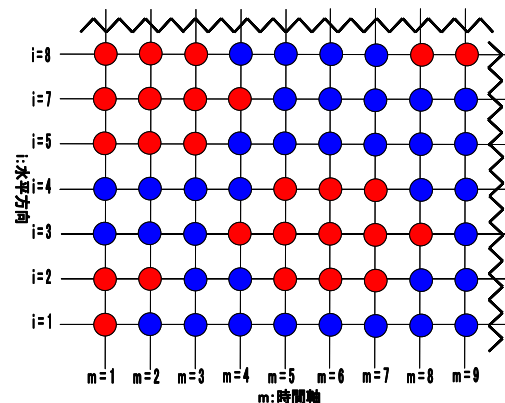
ステップ3. ～個々の構造の特性把握～

最後に、個々の構造の特性を決定する。例えば、各々のクラスターに識別番号 n を振り、それぞれの識別番号ごとに1点刻みにスパン方向の最大座標と最小座標を求め、その差を取り、それらの平均を求め、「構造 n の代表幅」とした。そして時間方向には各々の構造の持つ最大時間座標と最小時間座標から差を求め、「構造 n の代表持続時間」とした。そして各々の構造に対し、代表幅と代表持続時間の積を「構造 n の水平・時間領域」と定義し、それに温度変動の二乗を更に掛け合わせたものを「構造 n のエネルギー」と定義した（式1参照）。また、代表幅ごとに構造を分けし、分け毎に「構造 n のエネルギー」の全観測データでの積算値を「エネルギー分布関数」と定義する。



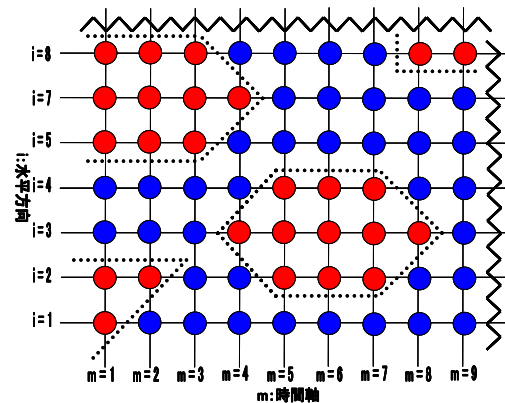
(a) 対象とするコンター図

(暖色：高温部、寒色：低温部)



(b) 二値化後(step1終了後)の図

(赤：閾値以上、青：閾値以下)



(c) クラスターの認識

図-6 模式図によるOSIMの途中出力結果

$$E(n) = \sum_{S_n} T'^2 \cdots \quad (\text{式1})$$

n : 構造識別番号

S_n : 構造 n の水平・時間領域

T' : 温度変動

$E(n)$: 構造 n のエネルギー

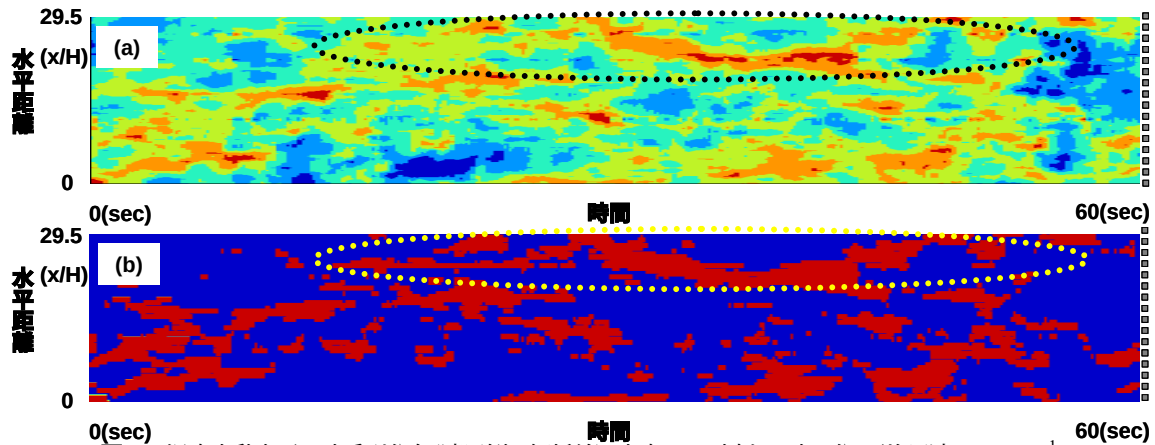


図-7 温度変動水平・時系列分布(適用例・解析前) 高度:2H 時刻:14時59分 平均風速 6.36 m s^{-1}
 (a)適用例・解析前 コンター範囲: T' $-0.5 \sim 0.5(\text{K})$ (b)適用例・二値化後 閾値を超える領域が赤色

適用例

図-7(a)の一分間の温度変動を対象にこの構造抽出アルゴリズムを用い解析を行ってみる。本解析手法では、閾値が結果に大きな影響を与える。例えば、閾値を大きくすると構造の幅は小さくなるのに対し、閾値を小さくすると、構造の幅が大きくなるという結果が予想される。また、温度変動の大きさは時間帯、外部気象条件によって大きく異なる。そこで閾値を一分間の温度変動に対する標準偏差の α 倍と設定した。ここでは $\alpha=0.8$ とした時の適用例を以下に示す。図-7(b)はステップ1の作業を終えたあとの出力結果である。閾値を超えた領域が赤色で描かれている。

図-8(a)-(c)はOSIMによって得られた構造のスケールの統計解析の結果である。図-8(a)はこの一分間での各構造の持つ代表幅の頻度分布であり、図-8(b)は各構造の代表幅及び代表持続時間の関係を示している。図-8(b)の青矢印で示した点は代表持続時間が44.7sec(447点分)、代表幅が約4.5m(6点分)の構造を示しているが、これは図-7(a)黒枠の構造に対応していると思われる。また、この青矢印で示したような構造は各代表幅に対し、長い代表持続時間を持つ。これらの点は低速ストリークといった組織だった乱流構造に対応しているものと思われる。図-8(c)は代表幅と温度変動のエネルギー分布関数である。図-8(a)では代表幅の小さいものが非常に多くの頻度を持っているが、エネルギー分布で見てみると非常に小さい(図-8(c))。一方、エネルギー分布関数のピークは代表幅が4.5m(6点分)、9m(12点分)、14.25m(19点分)であり、場の大きな変動をもたらす代表的な構造と考えることができる。

これに基づき、以下、エネルギー分布関数のピークを持つ構造を代表的な乱流組織構造と考える。

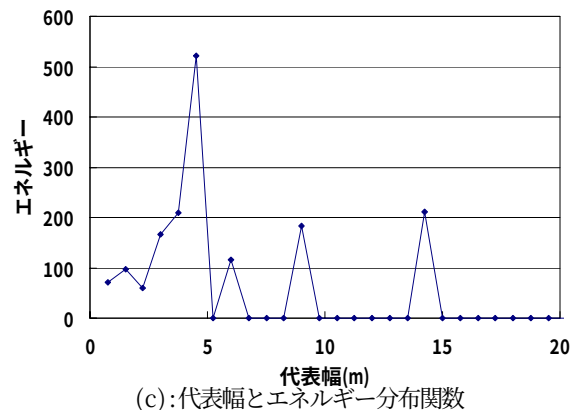
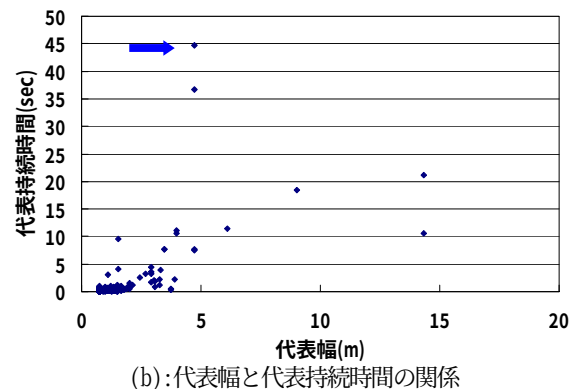
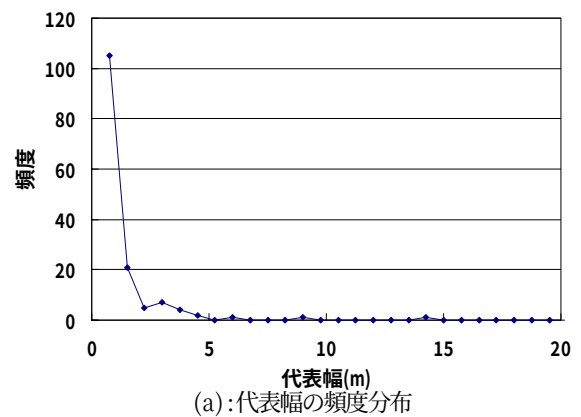


図-8 一分間データ(14:59)での正の閾値によるOSIM適用例

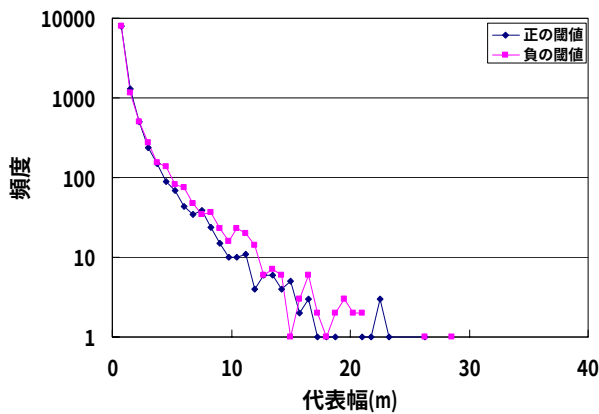


図-9 代表幅の頻度分布

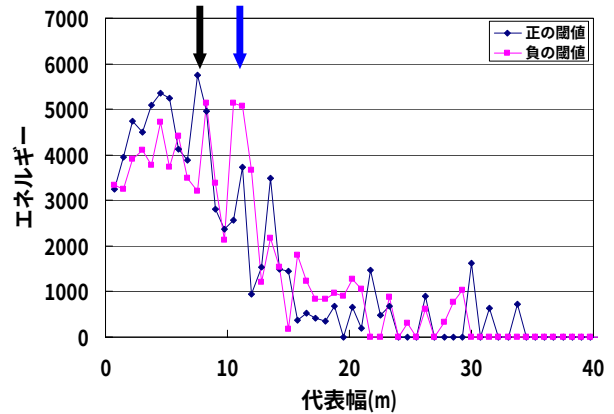


図-10 代表幅とエネルギー分布関数

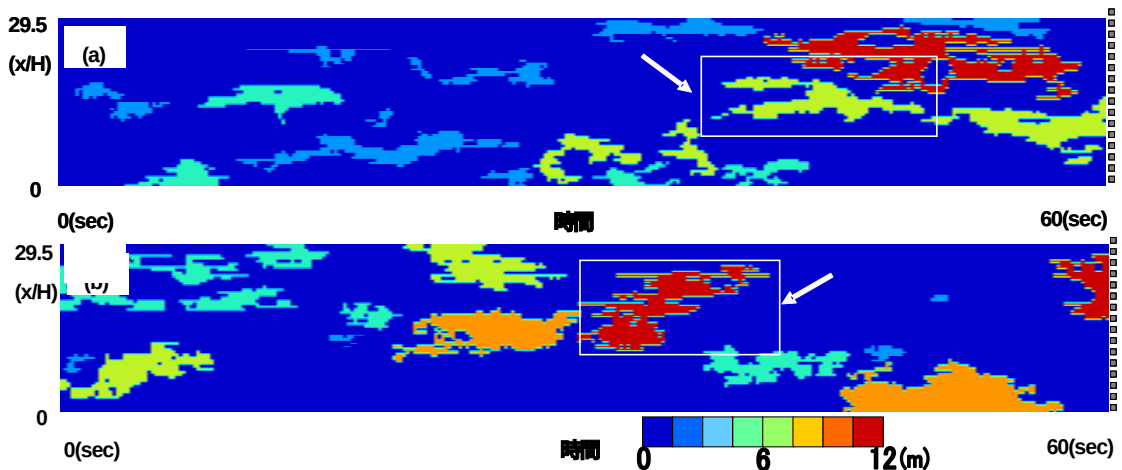


図-11 温度変動水平・時系列分布における抽出した構造の代表幅別コンター図

高度:2H 時刻:15時18分 平均風速 5.26 m s^{-1} コンター範囲:代表幅0~12(m)

(a) 正の閾値による構造抽出結果 (b) 負の閾値による構造抽出結果

4. 構造抽出法を用いた定量的解析

本論文で紹介したOSIM（組織構造抽出法）を用い、第二章で紹介した実験データを対象にして、乱流構造の定量解析を行う。全データを一分毎に構造解析を行うが、その際、水平構造を議論するうえで風向が大きな条件となるため、主流風向に対して平均風向 ± 5 度に収まる風向のみを対象に解析を行った。

α の設定は後ほど述べる二点相関法（4.(c)）によって算出された代表幅と近い解析結果となった $\alpha=0.8$ を採用する。

また α の値を正負に取ることにより($\alpha=\pm 0.8$)、高温部の構造（大気が不安定であるため、上昇流に相当）と低温部の構造（大気が不安定であるため、下降流に相当）、を同時に定量的に解析した。

(a) 乱流構造の強さと代表幅

代表幅の頻度分布の結果を図-9に示す。正の変動をもたらす構造及び、負の変動をもたらす構造はほぼ同じ頻度で出現している。代表幅とエネルギー分布関数の関係を図-10に示す。横軸は代表幅、縦軸はエネルギーとした。まず正の変動に着目する。図-10では代表幅7.5m(10点)

付近でピークが見られる（黒矢印参照）。こういったエネルギーピークに対応した構造は低速ストリークの存在によるものと思われる。図-11(a)中の白矢印で示したものは約7.5mの幅を持った構造の一例であり、細長く蛇行し、二股に分かれた構造を持つことが見て取れる。また負の温度変動を持った組織構造については幅約12m(15点分)でエネルギーのピークを持つ（図-10青矢印参照）。負の変動をもたらす領域は境界層上空よりの比較的低温の空気塊の流入であるが、これは低速ストリークよりも大きな代表幅を持つ。この幅に対応する組織構造を図-11(b)中に示す（白矢印参照）。

(b) 代表幅及び代表持続時間

図-12は正の閾値及び負の閾値で構造を抽出した場合の各々の組織構造に対する代表持続時間と代表幅の関係をグラフにしたものである。横軸は代表幅であり、縦軸は代表持続時間である。これを見ると、同じ代表幅に対し、正の温度変動をもつ構造の方が負の変動による構造よりも代表持続時間が長い。これは正の温度変動をもたらす構造が筋状の構造に起因しているのに対し、負の温度変動をもたらす上空からの吹き降ろしはより丸まった持続時間の短い構造によっていることが分かる。

(c)二点相関法との比較

上記の構造抽出法の他に二点相関法による解析を行い、両者の比較を行った。解析対象データである水平方向60点の温度変動を総当りで相関係数 $\text{cor}(i, ii)$ （地点*i*と地点*ii*の温度変動の相関係数）を算出する（ $60 \times 59 \div 2 = 1770$ 通りの相関係数を算出）。構造が通過している領域に含まれる点の間では強い相関を持つと考えられる。

図-13は地点1,13,25,35,48,59を中心とした相関係数のアンサンブル平均を示したものである。

組織構造の幅について比較する。構造の二点相関解析では相関係数 $1/e$ となる値で代表幅とする方法がよく行われているが、これに従うならば、二点相関により算出された構造幅は8.25m（11点分）となる（図-13での赤点線は $1/e$ に相当する）。この結果は、正の変動を持つ構造に対して本論のOSIM解析から得られた幅7.5m（10点分）と概ね一致している。

以上の結果は閾値を一分間の温度変動の標準偏差の ± 0.8 倍として解析したもので、アルゴリズムの正当性を肯定するものではない。ただ、これまで二点相関法を用いて議論されてきた事柄と上記の議論が関連づけられるものとする。

OSIM（乱流構造抽出）は、代表幅のように一般的な統計手法で得られる情報に加えて、これまで述べたような、各々の構造の持つ代表持続時間、頻度、構造の持つエネルギー、形状などの情報も得られる利点があり、乱流構造の解明に資する手法である。

5. まとめ

本研究では新たな乱流構造の構造抽出法を提案し、それを屋外スケールモデルでの観測データに適用し、以下の点が明らかにされた。

正の温度変動をもたらす乱流構造は、負の温度変動をもたらす組織構造よりも代表幅が狭く、代表持続時間が長い。これについて、前者は低速ストリークのような筋上の構造に起因しているものと考えられる。一方、負の温度変動をもたらす乱流構造はより代表幅が広く、持続時間の短い構造によるものと考えられる。

OSIM（乱流構造抽出法）は乱流構造を個別に解析することができるため、幅や長さ（持続時間）のみならず、曲がり具合や左右の非対称性などについても定量的に把握することができると考えられる。今後この手法を用いて、COSMOで観測されたデータから、外部気象条件（安定度、風向、風速）や、地表面条件（幾何形状、遮蔽率）と乱流構造のスケール・形状の関係等明らかにしていく予定である。

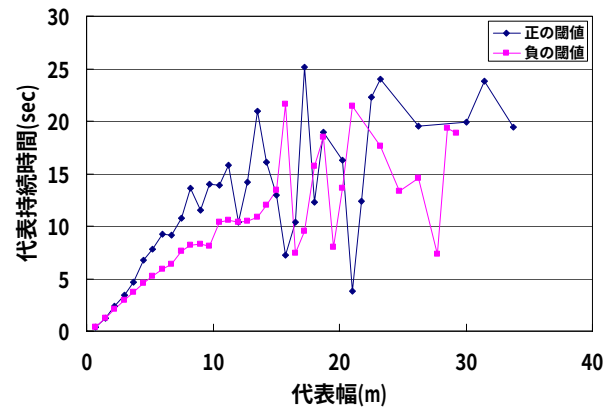


図-12 代表幅と代表持続時間の関係

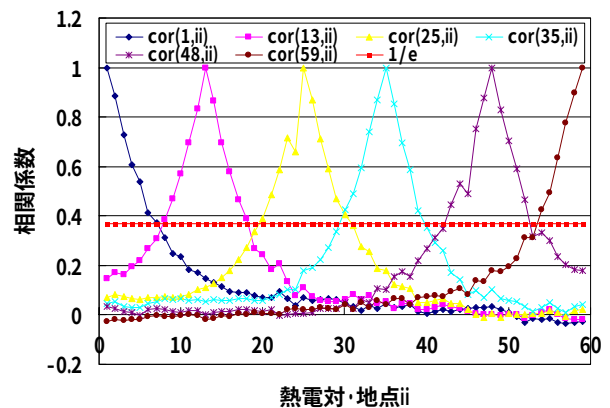


図-13 二点相関法による解析結果

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) 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，土木学会水工学論文集，Vol.50, pp.445-450, 2006.
- 2) Adrian et al.: 2000, 'Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer'.
- 3) Oikawa, S. and Y. Meng, : 1995, 'Turbulence characteristics and organized motions in a suburban roughness sublayer', Boundary-Layer Meteorol., 74, 289-312.
- 4) Watanabe, T. : 'Large-eddy simulation of coherent turbulence structures associated with scalar ramps over plant canopies', Boundary-Layer Meteorol., 00, 1-35, 2004.
- 5) Kanda, M. : 'Large eddy simulations on the effects of surface geometry of building arrays on turbulent organized structures', Boundary-Layer Meteorology, 118, 151-168, 2006.
- 6) Roth, M.: 2000, 'Review of atmospheric turbulence over cities', Q.J.R. Meteorol. Soc., 126, 941-990.
- 7) 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.

(2006.9.30受付)