屋外都市スケールモデルで観測された 乱流統計量の鉛直分布

TURBULENT STATISTICS OVER REGULARLY ARRAYED REDUCED URBAN SCALE MODEL

稲垣厚至¹・神田学² Atsushi INAGAKI and Manabu KANDA

¹学生会員 工修 東京工業大学 理工学研究科・日本学術振興会 特別研究員 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1) ²正会員 工博 東京工業大学助教授 理工学研究科(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

The present study investigated the vertical profiles of the turbulent statistics over the reduced urban scale model in a neutral stratification. The experiment was conducted under the planetary boundary layer so that the corrected data was always affected by the outer layer turbulence more or less. We compared the surface layer turbulence statistics in the scale model with that in urban, which are velocity spectra, momentum co-spectra and nondimensional velocity variances and so on.

A scale effect was apparent in the statistics related with the horizontal velocity variance. The scale effect came from the discrepancy of the ratio of outer layer (i. e. planetary boundary layer) scale with the surface layer scale of the scale model and with that of urban. Although the former scale is always same order, the latter scale is different in urban and in the scale model. Therefore we considered that the scale effect is an evidence of the influence of the outer layer turbulence in the surface layer.

Key Words : Scale effect, outer layer turbulence, spectrum analysis, Monin-Obukhov similarity, outdoor urban scale model experiment

1.はじめに

都市大気諸問題の解決あるいは局地気象モデルの高精 度化等のため,都市における大気乱流特性の把握は必要 不可欠である.しかしながら都市での実観測からはその 幾何形状複雑さや人間活動の多様性のため普遍的な議論 が難しく,また観測機器設置の困難等から観測例が乏し く依然として不明な点が多い.

そこで本研究では屋外準実スケールモデルにおいて乱 流統計量の鉛直分布を計測し,実都市での観測結果 (Roth¹⁾)と比較した.本スケールモデルの特長として は以下が挙げられる.1)個々の建物の形状や配列が一様 である.2)大気境界層下で実験を行っている.3)スケー ルが日本の典型的な住宅の約1/5である.

本研究意義としては,上記の1)の特徴から実都市の持 つ様々な複雑な要素を取り除き,都市幾何形状が作り出 す乱流統計量に関してより普遍的な議論が可能になるも のと考える. また2)から風洞実験や数値シミュレーションでは再現 の難しい,大気境界層(外層)と接地境界層の流れの相 互作用が起こりうる状況下で実験を行うことができる. これと3)の特長を踏まえることで,ある同一の(同オー ダーの)大気境界層スケールに対して,スケールモデル と実都市というスケールが明確に異なる2種類の接地境 界層があり,それぞれの接地境界層と大気境界層の相互 作用にはスケール効果が生じると考えられる.

つまり接地境界層内のパラメータのみで説明されるような乱流統計量にはスケール効果が働かず相似則が成立 し,外層の影響が大きく入り込むような統計量にはス ケール効果が現れ,相似則が成立しなくなるものと考え られる.本論ではこのような理論展開で外層の影響につ いても考察する.

本スケールモデルの持つその他の特長として,屋外に 設置されているため日射による大気安定度変化の影響や 自然風の影響(風向変化等)についても考慮することが できるが,本論では中立時で,風向が比較的安定した時 のデータのみ取り扱うこととする.



2. 理論的背景

(1) 抵抗係数

接地境界層における中立時の抵抗係数(抵抗係数の平 方根)は地表面形状に拠らず以下の式に従うとされる.

$$u_* / U = \kappa / \ln \left(z' / z_0 \right) \tag{1}$$

ここで u_* は摩擦速度(m s⁻¹), U は平均主流風速(m s⁻¹), κ はカルマン定数(=0.4), z' は有効高さで z'=z-d と定義される.z は高度(m), d はゼロ面 変位(m)である. z_0 は運動量粗度(m)である.

(2) スペクトル・コスペクトル

乱流変動における卓越した渦スケールの検討にはスペ クトル解析がよく用いられる.定点観測におけるスペク トル解析から直接得られるのは渦の時間周期であるが, テイラーの凍結仮説を仮定することで,水平風速を用い て空間スケールに変換される.なお大気境界層の渦ス ケールは境界層高度_z,で決定され約1000mのオーダー, 都市接地境界層のスケールは建物高さや観測高度で決定 され数十メートル程度,スケールモデルでは数メートル のオーダーである.なお接地境界層のスペクトル形状も 相似則が成り立つとされる(例えばKaimal²⁾).

(3) 無次元風速分散と運動量輸送効率

モニン・オブコフの相似則により,接地境界層において速度分散 σ は接地層の代表速度である摩擦速度で無次元化すると大気安定度z'/Lのみをパラメータとする普遍的な関数で表記される.

$$\sigma_u / u_* = \phi_u (z'/L) \tag{2}$$

$$\sigma_w / u_* = \phi_w (z'/L) \tag{3}$$

ここで添え字のuは主流風速成分,wは鉛直風速成分 を表す.Lはオブコフ長さ(m).式(2),(3)は都市, 植生,裸地などの地表面条件に拠らないとされているが, それぞれにおいて観測から得られた実験式が提案されて



図-2 超音波風速計配置図

いる.なお本研究では大気安定度が中立付近のときのみのデータを扱うため,無次元速度分散はある定数 $\phi(0)$ に収束し,高度変化も無くなる.

また実都市の参照値としてRoth¹⁾が提案した都市での 観測値から得られた普遍定数を用い,スケールモデルで の観測結果と比較する.その定数はそれぞれ $\sigma_u / u_* = 2.4$, $\sigma_w / u_* = 1.27$ である(図-7a,b). 運動量輸送効率は以下のように定義される.

$$R_{uw} = -\frac{\overline{u'w'}}{\sigma_u \sigma_w} \tag{4}$$

これは水平風速変動と鉛直風速変動が正味の運動量輸送 に寄与する割合を示す指標であり,式(2)と(3)とは次の ような関係にある.

$$R_{uw} = \frac{u_*}{\sigma_u} \frac{u_*}{\sigma_w} = \phi_u^{-1} \phi_w^{-1}$$
(5)

この関係を用いて計算すると,都市における参照値は約 0.33となる(図-7c).

3. 観測概要

(1) COSMO (Comprehensive Outdoor Scale MOdel experiment for urban climate)

図-1に屋外準実スケールモデル都市(COSMO)の略 図を示す.フラットなコンクリート平板の上に1辺1.5 mの立方体コンクリートブロックが水平32個×16個整列 配置されている.コンクリートブロックの建蔽率は0.25 である.

モデルの南西(図-1右側),中央,北西(図-1左側) に約8mの気象観測タワーが建てられており,中央のタ ワーを利用して乱流の鉛直分布を測定した.なお本観測 期間は冬季であり,この時の卓越風向は北西風であるた めフェッチは約50m(約33H,Hは平均建物高さ1.5mに相 当)確保される.



(2) 観測機器

乱流計測にはカイジョーDA600(プロープTR90-AH) を5台用いた.モデル都市中央の気象観測タワーを用い て,図-2に示すように5高度(上から順に4H,3H,2H, 1.5H,H)に風速計を設置した.サンプリング周期は 50Hzである.高度2H以上における風速計の測器間分散, 風速計設置箇所の違いによる値のばらつきは稲垣ら³⁾が 示す通り,本論の結論を左右するほど大きくない.

4.解析概要

(1) 解析データ

観測期間は2004年12月16日から2005年1月29日にかけ て約1ヶ月半観測を行った.この間のデータから30分毎 に平均統計量を算出し,アンサンブル平均した.アンサ ンブル平均からは以下のようなデータは全て省いた.1) 平均風向が風速計正面より45°以上,2)高度4Hでの平均 風速が2 m s⁻¹以下,3)雨天時のデータ.1)は風速計プ ローブ(図-2参照)の関係から,2)は接地境界層の発達 のため,3)は観測対象外のためである.

データ選別の結果として30分平均統計値が701サンプ ル残った.この時の大気安定度の鉛直分布は図-3に示す 通りやや安定である.しかし接地境界層内と考えられる 高度3H以下では誤差バーを含めて絶対値が0.05以下と なっており,Roth¹⁾で定義されている中立条件に収まる. そこでこの701サンプル全ての平均値を中立時のアンサ ンプル平均値として以下議論を進める.

(2) 各種統計値算出方法

時間平均統計量の中で,運動量フラックス算出の際に 測器の傾きは致命的であるので,主流風向以外の平均風 速成分($v \ge w$) $\ge v'w'$ が全てゼロとなるように傾 度補正を行った.また各種統計値やスペクトル算出の際 に線形トレンド除去を行った.

(3) スペクトル算出方法

本論ではFFT (Fast Fourier Transform)を用いて乱流変 動成分のスペクトル・コスペクトルを算出した.またス ペクトルのアンサンブル平均は以下のような手順を踏ん で行った.

まずFFTより算出されたスペクトル・コスペクトル強度 s をそれぞれ各種 2 次モーメント σ^2 で割って無次元化し,矩形窓平均によってスムージングを行った.周波数 f (Hz)については平均風速 U と有効高さ z'を用いて無次元化し,この無次元周波数が揃うようにアンサンブル平均を行った.なおスペクトル強度の表示には周波数 f をかけて重み付けした形として表す(図-5).

(4) 実都市のリファレンスデータ

実都市の参照値としてRoth¹⁾に引用されている各種統計値の推定値(図-4b,図-7a,bの実線),実測値(図-6a,b,cの各種プロット)を用いた. Roth¹⁾は様々な幾何形状の都市観測例を網羅しており,それらを建物高さで 無次元化した高度を用いて整理している.なお,各推定値は様々な幾何形状の都市観測データからのものである.

5.結果

(1) 抵抗係数の鉛直分布

まず始めに摩擦速度を各高度の平均水平風速で無次元 化した値(抵抗係数の平方根)の鉛直分布を見てみる. 図-4aの縦軸は有効高さを運動量粗度で無次元化した値 (z'/z₀),図-4bは高度を平均建物高さで無次元化し た値(z/H)となっている.後者は前者に比べ容易に 得られる情報なため実用的であり,都市観測のデータ整 理によく用いられる.

本論において運動量粗度₂₀とゼロ面変位*d*の値は,ス ケールモデルサイトの内部境界層内であると考えられる 高度1.5H, 2H, 3Hでのu * / Uの実測値が式(1)に当て はまるような最適値から推定した.その結果 $z_0 = 0.096m$, d = 1.2mとなった.これらの値は Macdnald⁴⁾による風洞実験の推定値($z_0 = 0.2m$, d = 0.68m)と異なるが,本研究は自然環境下で行って いるため室内実験とはいくつかの相違点がある.例えば 主流風向の変化は主流風向に対する建物配列の変化を意味し,それによって抵抗係数が変化するものと考えられ る(例えばKanda⁵⁾).

まず図-4aを見ると実線で示した理論値とよく一致しているが,これは観測値が式(1)に当てはまるような粗度とゼロ面変位を選んだためである.ただ,近年乱流組織構造についての研究が盛んに行われており,室内実験における壁面上のストリーク構造や植生上のローラー構造,また本スケールモデルにおいても筋上の乱流組織構造などが観測されているが(稲垣ら³⁾),それらを時間平均すると一律対数則に従う点は興味深く,対数則と組織構造の関係は明らかにされていない(Adrian et al.⁶⁾).

一方,縦軸を建物高さで無次元化した高度に対してプロットすると(図-4b)都市での推定値から若干ずれる. 高度1Hの値が都市の参照値(実線)から大きくずれるのは,この高度では個々の建物の影響を直接受けるため観測サイト間でばらつきが大きいためである.また1.5H,2Hでは都市の値よりやや小さめであるが,これは都市とスケールモデルで平均建物高さに対する粗度やゼロ面変位の値が異なるためと考えられる.一例として同じ平均建物高さでも建物高さにばらつきがある場合は抵抗が大きくなり,また建物配列によっても抵抗が変わる(例えばKanda⁵⁾).つまり図-4bの相違は平均建物高さ以外の都市幾何形状の相違によるものと考えられる.

(2) スペクトル・コスペクトル

次にスペクトル,コスペクトルから実都市とスケール モデルの渦スケールの相似性,あるいは大気境界層の渦 スケールとの比較を行う.図-5は*u*,*w*スペクトルと *uw* コスペクトル形状の高度変化を表すものである.ま ずそれぞれの卓越周波数に着目する.

a) 卓越波長(周波数)

図-6a,b,cの横軸は各種スペクトルのピーク周波数を 凍結仮説を用いて空間スケールに置き換え,それを建物 高さで無次元化した値であり,縦軸は建物高さで無次元 化した高度である.図中の破線で連結された点がスケー ルモデルでの観測値である.他の点はRoth¹⁾に参照され る実都市での観測結果であるが,それらは都市幾何形状 からおおまかにLD(建蔽率0.05~0.4,低層建物),MD (建蔽率0.3~0.5),HD(建蔽率0.5~0.8),HR(高層 建物)に分類される.本スケールモデルはLDに属する.

これを見ると建物高さで無次元化した u スペクトルの 卓越波長は,スケールモデルにおける値が実都市の値よ りも1オーダー程度大きくなっており,相似性が成り 立っていない.一方 w スペクトルに関しては,スケー ルモデルと実都市において建物高さで無次元化した卓越 波長の大きさが大方一致している.



図-5 各種スペクトル・コスペクトルの高度変化 (a)uスペクトル,(b)wスペクトル,(c)uwコスペクトル

接地境界層のu スペクトルは主に大気境界層の対流活動によってエネルギーが生成されているため(Kaimal²⁾),スペクトルピークは大気境界層スケールとなっている(1000 mのオーダー).それを建物高さという都市と本モデル都市でスケールが明確に異なるパラメータで除したため,図-6aのようにスケール効果が現れたと考えられる.図-6a中における×印を破線で結んだものはスケールモデルでの λ/H のHを実都市スケールに相当するよう5倍してプロットしたものであり,実都市の結果とオーダーが一致する.つまり λ_u が接地境界層スケールに依存しない値であることが分かる.

一方接地境界層の w スペクトルの卓越波長(図-6b) は実都市の値に近く,特にスケールモデルと幾何形状が 近いLD,MDについては非常によく合う.これは w の 変動が底面摩擦に代表される地表面条件に依存し,また



図-6 各種スペクトル・コスペクトルの卓越波長 (, , , : 建蔽率0.05~0.4の実都市(LD), , , : 建蔽率0.3~0.5の実都市(MD)) (, , : 建蔽率0.5~0.8(HD), , ⊗ : 高層建物(HR))

底面摩擦は建物高さに大きく依存するため,この無次元 量にはスケール効果が打ち消しあったと考えられる.ま たHDやHRではキャノピー内への風の入り方が大きく変 わるため建物の形状抵抗が変化し,統計値の相似性が保 たれなくなったと考えられる.

さらに運動量コスペクトルの無次元波長ピークを見る と(図-6c), これも都市とスケールモデルで非常によ く一致している.つまり主要な運動量輸送を担う渦ス ケールは接地境界層スケールであり,地表面形状に大き く依存することが分かる.

ところで本スケールモデルの接地境界層内において, 風洞実験などで見られる低速ストリークに類似した筋状 の乱流構造が観測されており(稲垣ら³⁾),そのスケー ルは流れ方向に100m以上,スパン方向に10m程度の構 造となっている.これと上記の議論を踏まえて考えると, 長手方向のスケールは大気境界層外層の変動が支配して おり,幅は接地境界層スケールに相当することから地表 面条件によって規定されている可能性が示唆される.

b) スペクトル形状

次に再びアンサンブル平均されたスペクトル,コスペ クトルの形状に戻って見てみる(図-5). u スペクトル に着目すると,高度4Hから2Hまでは,無次元周波数 0.01付近の大気境界層スケールに相当する低周波領域で 主要なエネルギーが生成されていることが確認できる. しかし高度が低くなるにつれ無次元周波数0.1から1.0の 間のエネルギー密度が徐々に盛り上がってきており, 1Hでは最もエネルギー密度が高くなっている.

この帯域は w スペクトルや uw コスペクトルの卓越周 波数帯とほぼ一致することから,地表面摩擦起因の接地 境界層スケール渦が水平風速変動をもたらしているもの と考えられる.つまり u スペクトルは地表面起因のエネ ルギー分布と外層(大気境界層)起因のエネルギー分布 の重ね合わせで決定されており,地表面に近づくにつれ て後者の割合が増加するものと考えられる.

また w スペクトルには大気境界層スケールの周波数 帯に主だった特徴が見られないことから, w 変動はほ ぼ完全に内部スケールで決定されていると考えられる. uw コスペクトルについては,大気境界層スケールの周 波数帯にわずかなふくらみが見られる(例えば図-5d). つまり若干ではあるが外層の渦が接地層の運動量輸送に 寄与している可能性が示唆される.

(3) 無次元風速分散と運動量輸送効率

上記の考察を踏まえて,都市とスケールモデル間の各 種無次元風速分散の相似性について検討する.

図-7a,bは各高度で算出された摩擦速度で無次元化し $t_u \ge w$ の無次元速度分散の鉛直分布である.まず, 都市とスケールモデル共に, wの無次元分散に比べて uの無次元分散のばらつき(誤差バー)が大きいことが 分かる.これはスペクトルで見た通り σ_u の値が大気境 界層のスケーリングに大きく依存するため,大気境界層 の状態変動に伴ってばらつきが生じたものと考えられる. 一方 σ_w/u_* は内部境界層スケールのみで説明される統 計量であるため,ばらつきも小さくなったと考えられる.

次に実都市とスケールモデルの無次元速度分散を比較 すると, *u* の無次元分散はスケールモデルの値が実都市 における値より大きめとなっており, 一方 *w* の無次元 分散については両者ほぼ一致する.これについて考察す る.

まず_{σ_u}は大気境界層スケールの変動が主となって生 成されていることがスペクトル解析の結果から分かり, そのスケールは都市とスケールモデルであまり変わらな いことは図-6aで示した通りである.これに対して運動 量の平方根である_u。は地表面形状の影響を受ける.そ のためより粗度の小さいスケールモデルでの_u。が実都 市より小さくなり,結果として_{σ_u}/u。はスケールモデ



図-7 各種無次元風速分散と運動量輸送効率 (実線は実都市での推定値であり,それぞれ(a) $\sigma_u / u_* = 2.4$, (b) $\sigma_w / u_* = 1.27$, (c) $R_{uw} = 0.33$)

ルの方が大きくなったと考えられる.一方で_σ, の値は スペクトル解析結果から示されるとおり外層の影響をほ とんど受けずに地表面スケールのみで決定されるため, 式(3)左辺の分子分母でスケール効果を打ち消し合い,相 似性が保たれた.

最後に運動量輸送効率を見てみる(図-7c).接地境 界層内での値を実都市と比較すると,スケールモデルで は輸送効率が小さくなる傾向にある.その原因としては, スケールモデルが作り出す正味の運動量輸送量に対して, 正味の運動量輸送を多く伴わない大気境界層スケールの 水平速度分散の値が大きいため,輸送効率が低下したも のと考えられる.これは運動量輸送効率が式(4)で定義さ れるように式(2)と式(3)の逆数の積であることからも推 測される.

6.結論

本研究では屋外スケールモデル都市(1/5スケール) と実都市での乱流統計量を比較し,以下の結論を得た.

まず抵抗係数の鉛直分布について,高度軸_{z'/z0}に対してプロットすると都市,スケールモデルによらず対数 則に従うが,高度軸をz/H としてプロットすると両者 のばらつきが大きくなる.これは都市との平均建物高さ 以外の形態学的な違いのためと考えられる.

次に大気境界層と接地境界層間の相互作用について分かったことは,鉛直風速変動にはほとんど相互作用は存在せず,接地境界層内部スケールのみで説明されており,都市と実都市の間でスケール効果は存在せず,相似性が成り立つ.

水平風速変動に関してはスペクトル形状から大気境界 層スケールの乱流変動と接地境界層スケールの変動の両 方から特徴が決定されていると考えられるが,前者に卓 越周期があることから大気境界層スケールの変動が支 配的であると考えられる.そのためu変動に関連した統計量を接地境界層内部スケールのパラメータで無次元化するとスケール効果が生じる.

運動量輸送に関しては大方接地境界層内部スケールで 決定されるためスケール効果は生じない.しかしコスペ クトル形状を見ると若干大気境界層スケールの変動の影 響を受けているように見受けられる.運動量の輸送効率 に関しては,運動量変化に大きく作用しない外層起因の u 変動の寄与度によって変化する.なおスケールモデル の方がその寄与は大きいため輸送効率は小さい.

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:神田学),科学研究費補助金(特別研究員 奨励費)の財政的支援を受けた。ここに謝意を表します。

参考文献

- Roth, M.: Review of atmospheric turbulence over cities, Q. J. R. Meteorol. Soc., Vol. 126, pp. 941-990, 2000.
- Kaimal, J. C.: Horizontal velocity spectra in an unstable surface layer, J. Atmos. Sci., Vol 35, pp18-14, 1978.
- 3) 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,51巻, 2006.
- Macdonald, R. W., Griffiths, R. F., Hall, D. J.: An improved method for estimation of surface roughness of obstacle arrays *Atmos. Environ.*, Vol. 32, pp1857-1864. 1998.
- Kanda, M.: Large eddy simulations on the effects of surface geometry of building arrays on turbulent organized structures, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol.118, pp151-168, 2006.
- Adrian, R. J., Meinhart, C. D., Tomkins, C. D.: Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, Vol. 422, pp1-54, 2000.