

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 non-dimensional 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樣である。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する。

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。

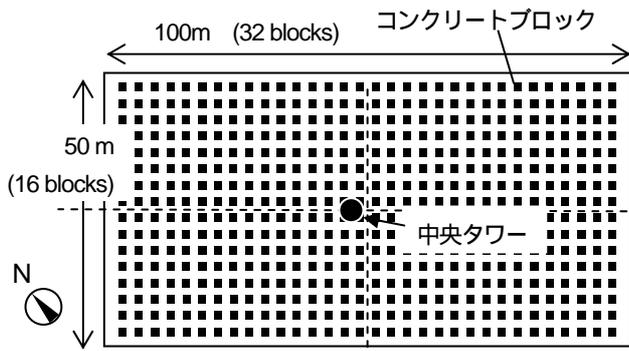


図-1 屋外都市スケールモデル (COSMO)

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．

$$u_* / U = \kappa / \ln(z' / z_0) \quad (1)$$

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_i 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．

$$\sigma_u / u_* = \phi_u(z' / L) \quad (2)$$

$$\sigma_w / u_* = \phi_w(z' / L) \quad (3)$$

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

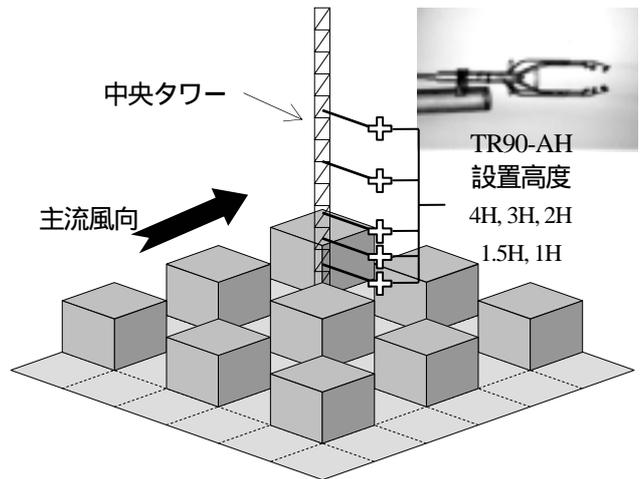


図-2 超音波風速計配置図

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．

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

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．

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

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1.5m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．

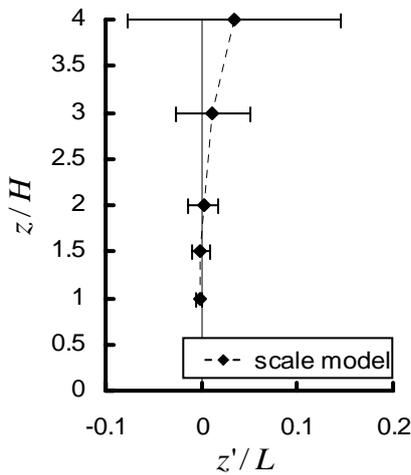


図-3 大気安定度の鉛直分布

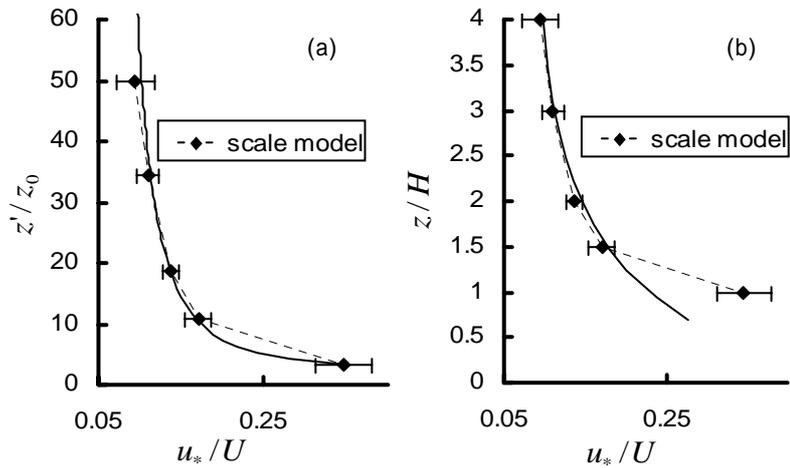


図-4 抵抗係数の鉛直分布

(実線はそれぞれ(a)理論値, (b)都市観測からの推定値)

(2) 観測機器

乱流計測にはカイジョーDA600 (プローブ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ブ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 と w) と $\overline{v'w'}$ 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'/z_0)、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 z_0 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 $z_0 = 0.096\text{m}$, $d = 1.2\text{m}$ となった。これらの値はMacdnald⁴⁾による風洞実験の推定値($z_0 = 0.2\text{m}$, $d = 0.68\text{m}$)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。

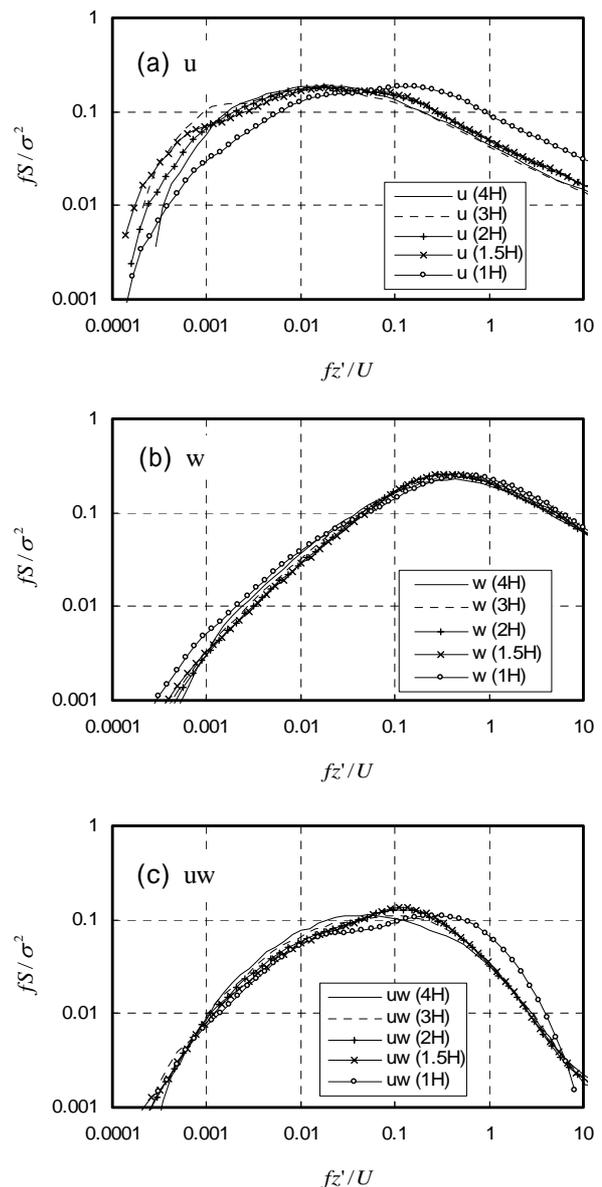


図-5 各種スペクトル・コスペクトルの高度変化
(a)uスペクトル, (b)wスペクトル, (c)uwコスペクトル

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

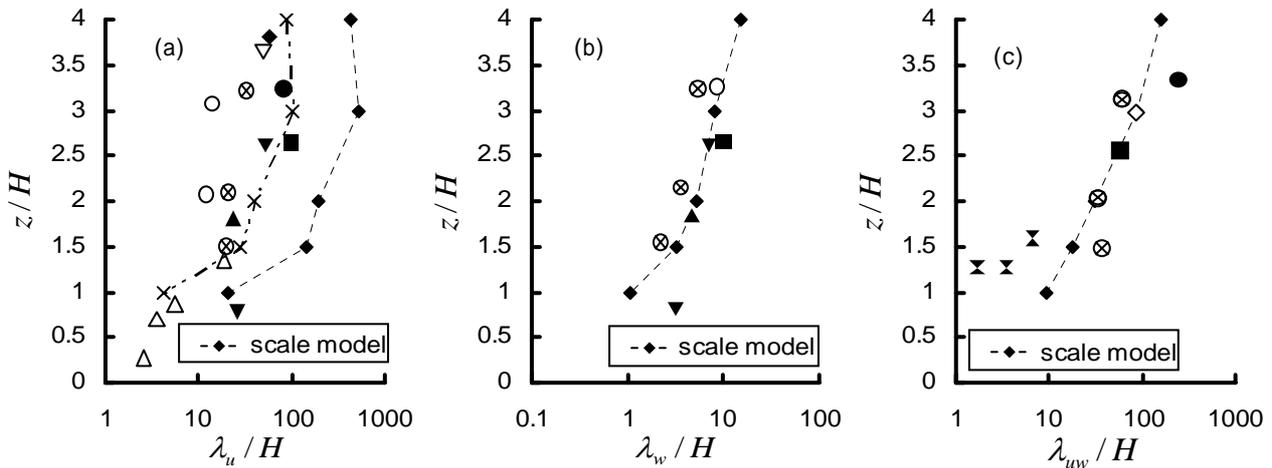


図-6 各種スペクトル・コスペクトルの卓越波長

(Δ , \circ , \square , \times : 建蔽率0.05~0.4の実都市(LD), \triangle , \diamond , \square : 建蔽率0.3~0.5の実都市(MD))
 (\blacktriangle : 建蔽率0.5~0.8(HD), \otimes : 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た u と 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ル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

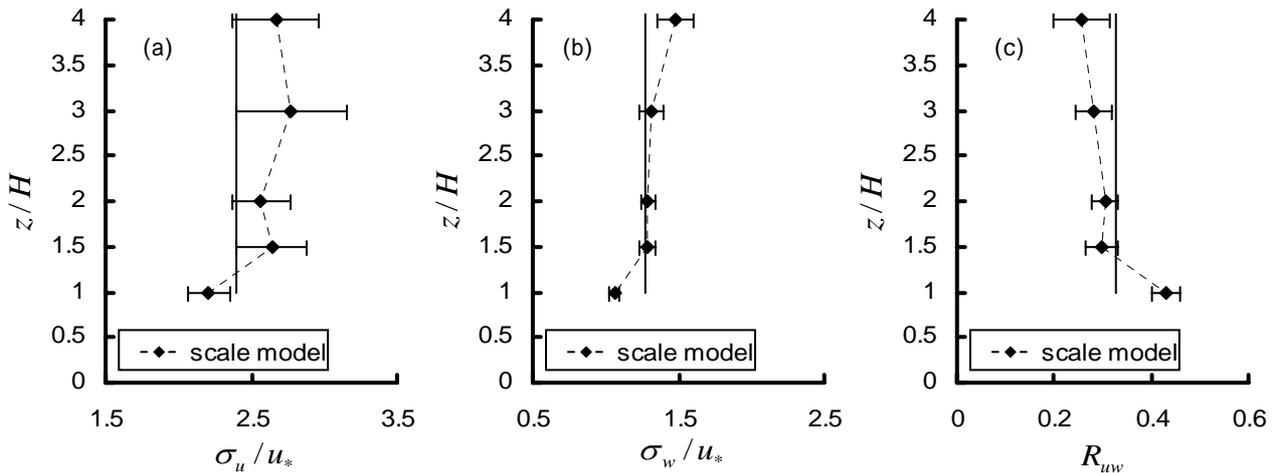


図-7 各種無次元風速分散と運動量輸送効率
 (実線は実都市での推定値であり、それぞれ(a) $\sigma_u / u_* = 2.4$, (b) $\sigma_w / u_* = 1.27$, (c) $R_{uw} = 0.33$)

ルの方が大きくなったと考えられる。一方で σ_w 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してみる(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'/z_0 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

- 1) Roth, M.: Review of atmospheric turbulence over cities, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, Vol.126, pp.941-990, 2000.
- 2) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.