

市街地上空風の鉛直分布の推定法に関する研究

片岡 浩人

Study on the Estimation of Vertical Wind Velocity Profiles above Urban Area

Hirotō Kataoka

Abstract

The vertical wind velocity profiles dominate wind loadings acting on tall buildings. AIJ (Architectural Institute of Japan) Recommendations for Loads on Buildings prescribe velocity profiles according to terrain conditions. The effects of terrain conditions can be treated by the surface roughness parameters such as the roughness length scale and the roughness density. These parameters, however, cannot explain the profile over urban areas necessarily since the urban buildings form a non-uniform roughness. In this study, numerical flow computations by LES (Large Eddy Simulation) are conducted to predict vertical wind velocity profiles over an existing urban area. The computed results are confirmed by the observation data obtained by a Doppler LIDAR (Light Detection And Ranging) system at neutral atmospheric conditions. Then the effects of roughness parameters to the velocity profiles are discussed by using present results and an evaluating equation is presented for predicting the power law index of vertical velocity profiles over urban buildings.

概要

高層建物に作用する風荷重は、風速の鉛直分布の影響を大きく受ける。そのため日本建築学会による建築物荷重指針・同解説では地表面の状態に応じて風速の鉛直分布を規定している。地表面の状態による影響は、粗度長さや粗度密度といった粗度パラメータによって扱うことができる。しかし実際の都市では建物が不均一な粗度を形成しているため、これらのパラメータによって必ずしも鉛直気流分布を再現できる訳ではない。本研究では、まず市街地上空で形成される風速の鉛直分布をLES(Large Eddy Simulation)による数値流体計算によって再現する。この計算結果は、中立的な大気条件化でドップラーライダーシステムによって観測された風速分布との比較により検証する。そして計算結果を用いて各種粗度パラメータが風速分布に与える影響について考察し、市街地上空における風速鉛直分布のベキ指数を予測する評価式を提案する。

1. はじめに

高層建築物に作用する風荷重を評価する場合、建物の立地条件を反映した風速の鉛直分布を求める必要がある。日本建築学会による建築物荷重指針・同解説¹⁾ではTable 1に示すようにI~Vの5種類の地表面粗度区分を設定し、各粗度区分毎に平均風速並びに乱れ強さの鉛直分布を定めている。ただし、地表面の状況に関する説明からだけでは、一義的に地表面粗度区分を判定する事が難しい場合も多い。構造骨組み風荷重に関しては、滑面側の粗度区分を選定することで、安全側の評価が得られる。しかし、風揺れ居住性改善のための制振装置選定では、滑面

側の粗度区分選定は、過剰な設備投資につながる。

市街地における地表面の状況とその上空で発達する平均風速分布との関係については、既往の研究^{2-6, 9, 11)}がある。いくつかの研究^{2-4, 6, 11)}では、平均風速の鉛直分布をベキ乗則に近似したうえで、このベキ指数と各種の地表面粗度パラメータとの関係について調べている。

中村²⁾は地表面粗度を評価するパラメータとして500mメッシュ区画内の建築面積率(調査対象地域の面積に対する総建築面積の比)と中高層化率(総建築面積に対する4階建て以上の建物の建築面積の和)に着目し、風洞実験結果や観測結果からこれらの値が平均風速鉛直プロファイルのベキ指数に与える影響を調べている。それに

Table 1 地表面粗度区分¹⁾

Flat terrain categories

地表面粗度区分	建設地および風上側領域の地表面の状況	
滑	I	海面または湖面のような、ほとんど障害物のない地域
↑	II	田園地帯や草原のような農作物程度の障害物がある地域、樹木・低層建築物などが散在している地域
	III	樹木・低層建築物などが多数存在する地域、あるいは中層建築物(4~9階)が散在している地域
↓	IV	中層建築物(4~9階)が主となる市街地
	V	高層建築物(10階以上)が密集する市街地
粗		

よると、ベキ指数は中高層化率の影響をより大きく受け、かつ建築面積率が高いほどその傾向が強められる事が報告されている。ただし観測値は、提案式や指針式に示される値よりも大きなベキ指数をとる場合があるとした。

丸山³⁾はRANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)モデルを用いた数値流体解析を行い、海岸から内陸に至る実在市街地上空の平均風速のベキ指数を求めた。ただし水平格子解像度は70mで、市街地は都市キャノピーモデルで再現している。さらに丸山⁴⁾は5種類の仮想市街地を対象とした解析を行った。その結果、ベキ指数に与える影響は建物高さの方が建築面積率よりも大きい事、吹走距離が長くなるとベキ指数に与える市街地のタイプや建築面積率の影響は小さくなる事などを報告している。

片岡ら⁵⁾は、新宿の超高層ビル群にある個々の建物形状を水平解像度5mの格子で直接再現し、ビル群風下に形成される気流分布の予測をRANSおよびLES(Large Eddy Simulation)で行った。風洞実験結果との比較から、RANSによる予測値はビル群風下の後流域の大きさを過大評価する一方で、LESは平均風速ならびに乱れ強さの鉛直分布が実験結果とよく一致する事を示している。

岸田ら⁶⁾は4地域の実在市街地を対象とした11ケースのLESを実施し、平均風速分布のベキ指数と粗度密度 λ との関係を調べている。Raupachらの提案式⁷⁾とCounihanの式⁸⁾を用いて、粗度密度 λ から粗度長 z_0 を介して求めたベキ指数と、計算結果のベキ指数を比較したところ、計算結果は大きめの値を示した。岸田らはその原因として、Raupachらの提案式では粗度密度 λ が0.1より大きいところでは粗度長がむしろ減少するが、建物高さが不均一な

市街地ではこの関係はあてはまらないと考察した。また粗度密度が大きくなるに従って建物高さがのぼらつきも大きくなる事に着目して、新たにベキ指数と粗度密度 λ の関係式を提案している。

義江ら⁹⁾は香港の密集市街地を想定した風洞実験を行い、建物群の形態の違いが、街区内の歩行者レベルにおける風速に与える影響を調べた。その結果、同じ建築面積率でも建物高さにばらつきがある場合には、市街地の風通しが改善される事が示された。そこで最高建物高さに基づく高さ方向平均建築面積率を提案し、同値で歩行者レベルの通風状況が予測できる事を示した。

以上の既往の研究から平均風速鉛直分布のベキ指数の評価では、実在市街地上空における非一様な建物高さへの考慮が必要であると考えられる。もしベキ指数を支配する市街地形状に関する因子が明らかにできれば、Table 1に示す地表面の状況説明に頼らずに、あるいは風洞実験や数値流体解析を行わなくとも、設計風速の合理的な評価が可能となる。その結果、例えば短期間での制振装置の能力選定が期待できる。そこでLESで市街地上空風の解析を行い、平均風速鉛直分布の結果から、市街地建物の各種因子とベキ指数の関係を調べた。

2. LESによる市街地上空風の予測

2.1 計算方法

2.1.1 街区モデル 解析対象となる街区の範囲をFig. 1に示す。東京湾臨海部を南端とし東西2km×南北19.5kmの領域を対象とした。個々の建物形状はGISデータから取得し、高さは同データ中の階数情報に階高さ3.5mを一律にかける事で求めた。また東京湾岸から続く比較的平坦な地形であるため、地形の影響は無視した。

2.1.2 数値解析手法 上記の計算領域を水平方向に格子解像度10mの直交等間隔格子で分割した。計算領域をFig. 2に示す。鉛直方向には領域高さを2kmとし、格子幅2m~300mの不等間隔格子を用いた(要素数：200×1,950×63=約2,450万)。なお、この解像度では、個々の建

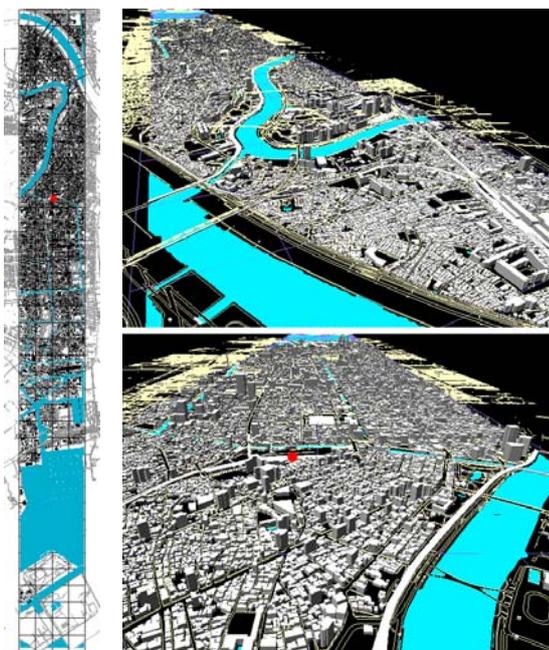


Fig. 1 計算対象領域(左)と領域内の建物形状(右)
赤点は風観測点を示す。

Objective domain (left) and building models (right)

Red dot denotes the observation site

© 2011 ZENRIN CO., LTD. (Z09KA第039号)

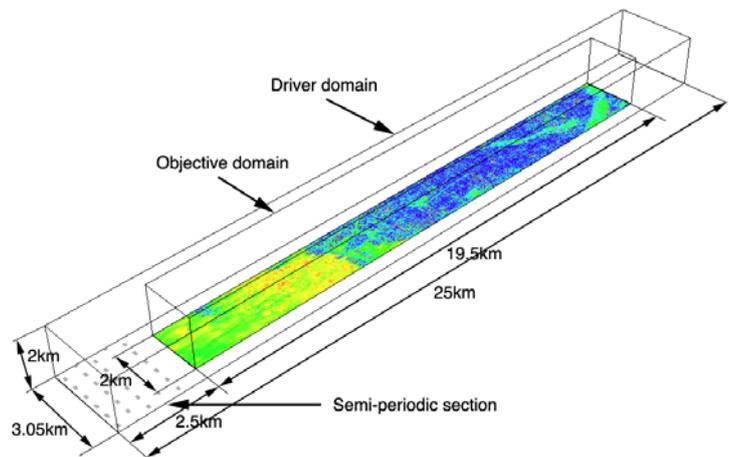


Fig. 2 計算領域
Computational domain

物からのはく離せん断層発生に関する詳細な再現は不可能であるが、ランダム配置された粗度要素としての建物影響は予測可能と考える。

基礎式に擬似圧縮性の式を採用した。この基礎式を有限体積法で離散化し¹⁰⁾、その際FAVOR法を用いて、個々の要素中に空気が占める体積占有率ならびに要素界面の開口率を考慮した。

対流項にUTOPIAスキームの1/2の数値粘性を持った風上差分、時間項に二次精度陰解法、空間二次精度中心差分を用いた。Sub-grid scaleの乱れに対するモデルは、上記の数値粘性で代用した。建物と地表面はno-slip、上空と準周期境界以外の側面はfree-slipをそれぞれ課した。

風向は南とし、南端の流入境界では次式で流入気流の鉛直分布を与える。

$$\frac{U(z)}{U(z_G)} = \left(\frac{z}{z_G}\right)^\alpha \quad (1)$$

吉田ら¹¹⁾のドップラーソーダを用いた沿岸での観測結果をもとに、境界層高さ z_G は400m、ベキ指数 $\alpha=0.1$ とした。ただしFig. 2に示す様に、対象領域の外側に水平方向のみ粗い(鉛直方向は同じ)格子解像度を持つドライバ部

(要素数：61×250×63=約96万)を別途設け、ドライバ部風上側で主流方向に準周期境界条件¹²⁾を設定し気流を作成した。

はじめにドライバ部単独で気流を作成した後、ドライバ部の中に対象領域を挿入し、両者の流れ場を同時に解析する。その際、各時刻・収束計算毎に、両者の間で2-wayのネスティングを行なった。

上空風の風速を $U(z_G)=1.0\text{m/s}$ 、時間刻み $\Delta t=1\text{s}$ とし42,000ステップ分の計算を実施した。対象領域の統計量は、計算領域内の流れ場が十分に発達したとみなせる後半32,000ステップの値から求めた。

2.2 計算結果

2.2.1 流れ場の計算結果

対象領域内のスカラー風速の瞬間値ならびに平均値の分布をFig. 3, 4に示す。地表付近では、海岸線に沿って急激に風速が低下する一方で、公園や運河、あるいは隅田川・荒川といった河川で速度の回復が見られる。地上105m上空では海外線から約2km風下で風速の低下が生じ、地表付近のような局所的な速度の回復は生じない。

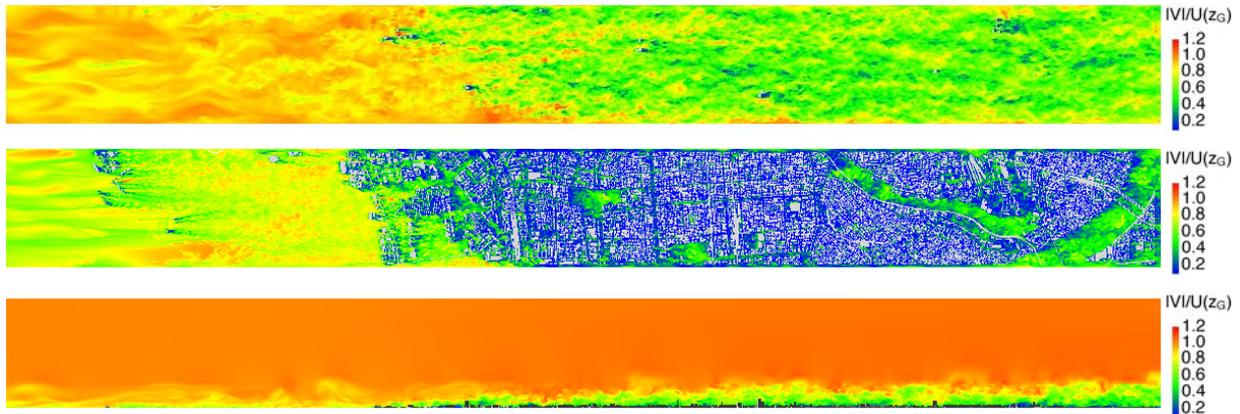


Fig. 3 計算領域内の瞬時スカラー風速の分布 (上段：地上105m, 中段：地上5m, 下段：鉛直中心断面)
Instantaneous distributions of scalar wind velocity (z=105m, 5m and vertical section)

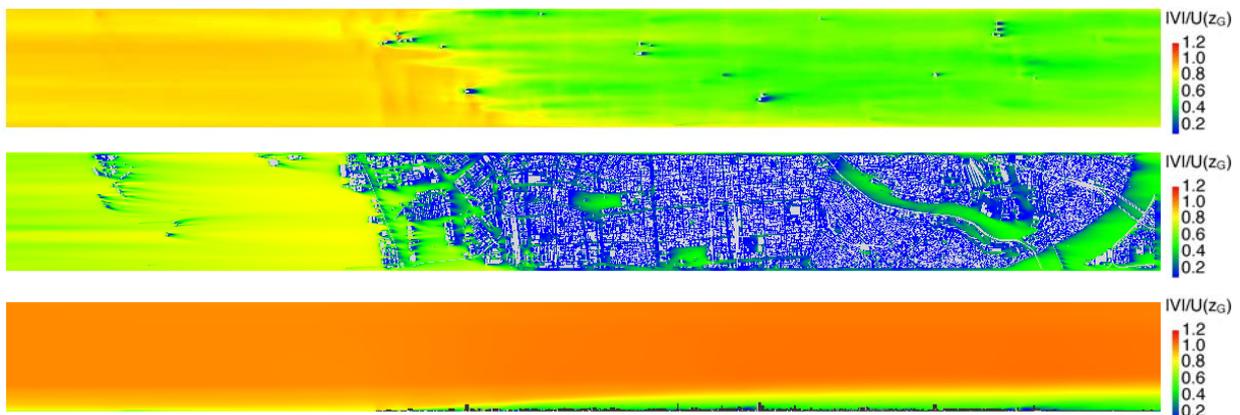


Fig. 4 計算領域内の平均スカラー風速の分布 (上段：地上105m, 中段：地上5m, 下段：鉛直中心断面)
Time-averaged distributions of scalar wind velocity (z=105m, 5m and vertical section)

2.2.2 平均風速の鉛直分布 平均風速ならびに変動風速の鉛直分布の風方向の変化をFig. 5に示す。各プロファイルは、Fig. 5aに赤丸で示す計算領域端部から1km毎

のポイントで抽出した。0-4kmの区間は海上、5-9kmは海岸から内陸への遷移、10km以降は内陸部である。Fig. 5bの平均風速分布より、海岸(赤丸6km)から内部境界層が発

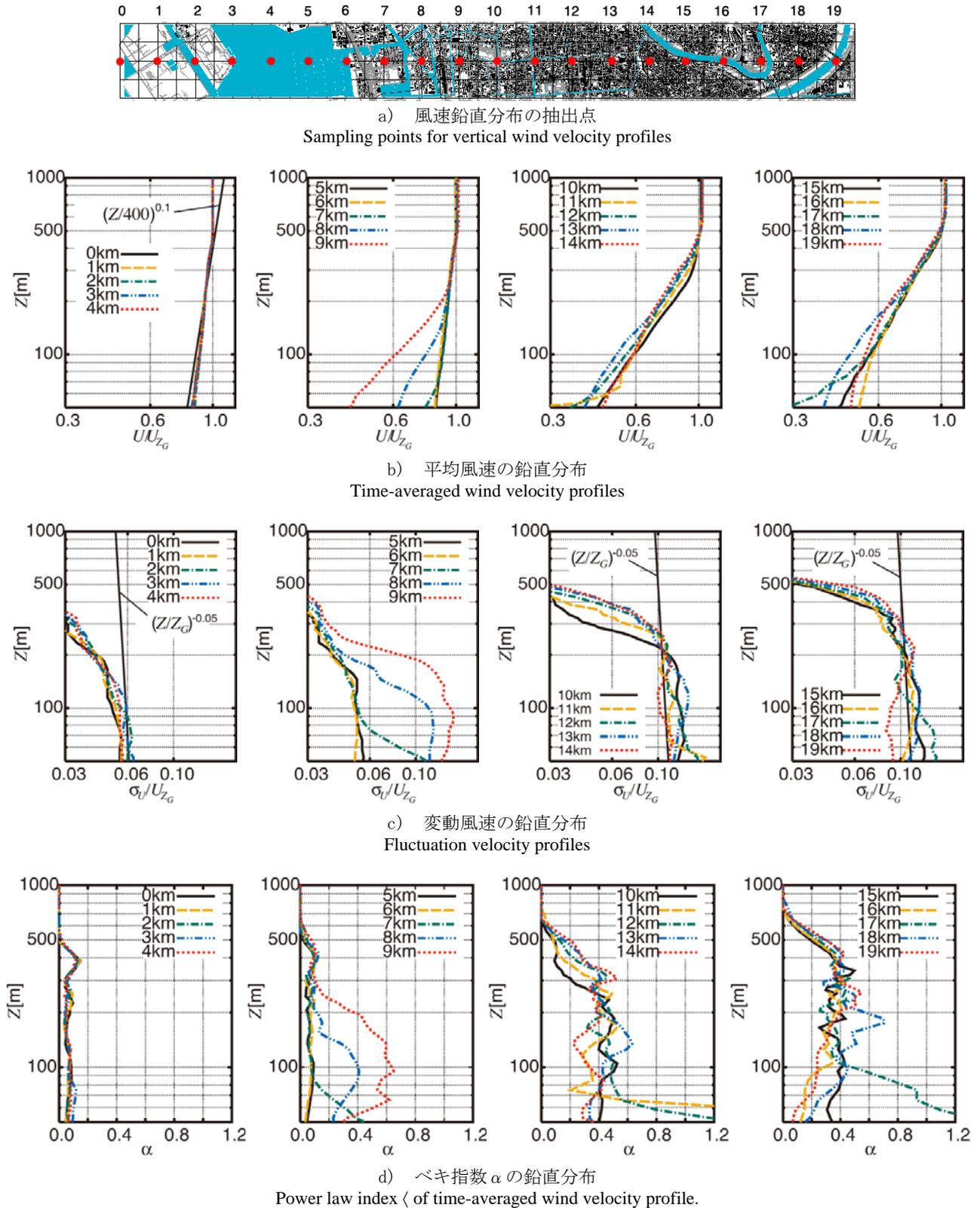


Fig. 5 鉛直中心断面における平均風速分布の風下方向への発達
Evolutions of vertical profiles along wind-directional center line.

達しはじめ、海岸から約5km(赤丸11km)の地点で接近流の境界層高さに到達していることが伺える。

Fig. 5cの変動風速の鉛直プロファイルでは、海岸からの内部境界層が発達途中の領域を除けば、海上・内陸部ともに勾配のべき指数は、およそ-0.05乗とみなせる。

Fig. 5dに平均風速のべき指数分布を示す。べき指数は、各計算格子点で、隣接する上下の格子点の風速と高度から求めた。内陸の100m以下の高さでは個々の建物の影響を受けるので、べき指数のばらつきは大きい。一方で高度100-400mでは多少の変動はあるものの、ほぼ0.4付近の値を示している。

このように、海岸から内陸に向かうに従って内部境界層が発達するとともに平均風速鉛直分布のべき指数も変化の様子を、本計算結果は再現している。

2.3 観測値との比較

本計算結果を検証する目的で、観測値との比較を行った。観測場所はFig. 1に赤丸で示す場所(計差領域南端から約13.5km)で、ドップラーライダーシステムによる観測値^{1,2)}を用いる。

検証に用いる観測値は南よりの強風が吹き、かつデータ取得率の高い時間帯とし、2009年10月8日7時20分と2010年4月2日3時0分を採用した。両観測時の気象条件をTable 2に示す。

観測値とFig. 5aに示す点13番(計算領域南端から13km)における平均風速鉛直分布の比較を、Fig. 6に示す。観測値は地上500mの風速で基準化した。地上500mの高さまで三者はよく一致している。これにより本LES計算結果の妥当性が示された。

3. 地表面粗度と平均風速鉛直分布の関係

3.1 Raupachらによる粗度密度と粗度長の関係

ここでは岸田ら⁶⁾と同様に、Raupachらの提案式⁷⁾とCounihanの式⁸⁾を用いて、粗度密度 λ から粗度長 z_0 を介して求めたべき指数 α を求めることとする。Raupachら⁷⁾の粗度密度 λ はFig. 7に示すように調査対象地域の面積 S に対する粗度要素の風方向見附面積 A_i (=見付幅 $D_i \times$ 高さ h_i)の総和で、次式より求められる。

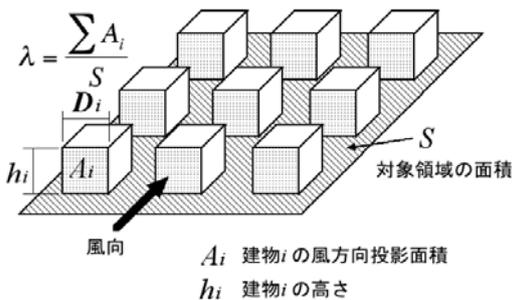


Fig. 7 粗度密度 λ と粗度長 z_0 の関係⁷⁾
Relations between roughness density λ and roughness length z_0

$$\lambda = \frac{\sum A_i}{S} = \frac{\sum D_i h_i}{S} \quad (2)$$

粗度密度 λ が0.1以下の場合には、 λ に比例して粗度長 z_0 の粗度高さ h に対する比は大きくなる。しかし0.1付近で粗度長は最大値をとった後は、粗度密度の増加とともに z_0/h は小さくなる。これは粗度要素間の距離が縮まることで、気流が粗度要素間の床面に到達しないで上空を通り過ぎるだけのSkimming flowと呼ばれる状態に推移するためである。その結果、みかけ上の粗度長が小さくなる。ただし、これらの関係は粗度高さ h がほぼ一様とみなせる場合についてのものである。

Fig. 7で示す粗度密度と粗度長との関係を、ここでは次式のように近似する。

$$\begin{aligned} z_0/h &= \lambda & \lambda < 0.1 \\ z_0/h &\cong 0.01\lambda^{-1} & \lambda \geq 0.1 \end{aligned} \quad (3)$$

一方Counihan⁸⁾は、粗度長 z_0 とべき指数 α の関係式として次式を提案した。

$$\alpha = 0.24 + 0.096(\log_{10} z_0) + 0.016(\log_{10} z_0)^2 \quad (4)$$

Table 2 観測日時と気象条件
Observation date and conditions

観測年月日	気象条件	地上500mの風	
		風速[m/s]	風向
2009年10月8日	台風0918号通過	22.6	S
2010年4月2日	低気圧通過	22.7	SSW

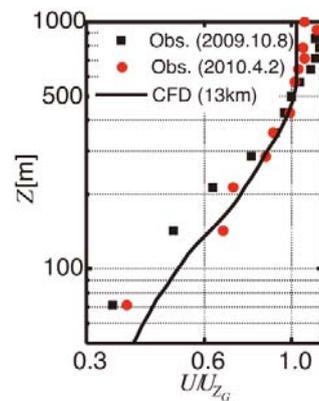
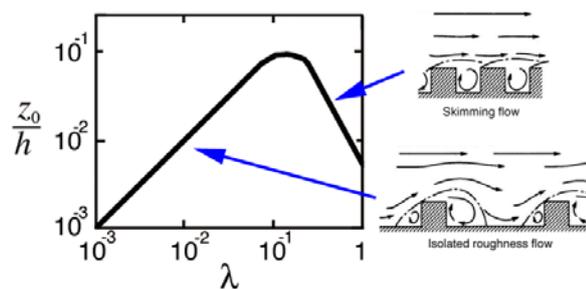


Fig. 6 計算結果と観測値との比較
Comparison between present results and observation data



3.2 ベキ指数の変化と粗度パラメータの分布

Fig. 8に風方向中心ライン上でのベキ指数 α ならびに速度境界層高さの風方向の変化を示す。

ベキ指数は各地点で高度100-200mと200-400mの二つの区間での平均値を求めた後、風方向の移動平均で平滑化を行った。海岸からの内部境界層の発達に従ってベキ指数は増加し、両高度ともに概ね0.4程度の値を示す。ただし、高度100-200mでは同高度に達する建物の影響が見られ、局所的に0.6近くの大きな値をとる。

速度境界層高さは、上空境界層高さ Z_G (流入境界における $U(z_G)$ の99.5%となる高さ)と、建物の影響を受けて海岸から発達する内部境界層高さ Z_{IBL} (流入境界における風速分布と等しくなる高さ)の二通りを示す。内部境界層高さは海岸から約5kmで、流入気流の境界層高さまで達している。この時、高度200-400mのベキ指数 α は約0.4に到達し、以降安定している。

次に、Fig. 9に計算領域内の粗度密度 λ の分布を、同じ評価領域内で求めた平均建物高さ h_{mean} ならびに最高建物高さ h_{max} の分布と共に示す。このうち粗度密度は次の手順により求めた。

- 1) 有限体積要素毎に、風方向界面での建物による閉塞率の差(風下界面-風上界面)を求める。
- 2) 正の値のみを地表面から高さ方向に積算し、この地点における風方向見付面積とみなす。
- 3) 計算領域の中心軸に沿った東西1km×南北1kmの範囲を評価領域とし、同領域内の風方向見付面積の総和から、粗度密度 λ を求める。
- 4) 以上の操作を風方向に繰り返す事で、計算領域の中心軸に沿った粗度密度 λ の分布を求める。

平均および最高建物高さも同様に、東西1km×南北1kmの範囲を評価領域として求めた。

平均建物高さの分布から、東京湾岸埋め立て地で平均建物高さが7mとなった後、海上に出て0となる。再上陸後、臨海部の超高層集合住宅により25mまで急上昇。その後内陸部では中規模建物により約15mで安定する。領域の北端部で隅田川沿いの高層集合住宅群により再び上昇した後、荒川との交差により低下している。最高建物高さは臨海部で約200mである。

一方粗度密度は、建築面積率が低い臨海部では小さく、中規模建物が密集する内陸部でピークを示す。

3.3 粗度パラメータとベキ指数の関連づけ

Raupachら⁷⁾に従って粗度長を評価し、Counihanの式⁸⁾からベキ指数 α を評価した結果をFig. 10aに示す。

Raupachらの方法では、一様な粗度高さを想定している。ここでは粗度高さに平均建物高さ h_{mean} と最高建物高さ h_{max} を用いた二通りの方法で粗度長を評価し、Counihanの式で α を求めた。粗度密度が広範囲で0.1を超えていることから、内陸部では粗度長はむしろ小さくなり、結果としてベキ指数 α はFig. 8aと比べるといずれの高さを用いても過小

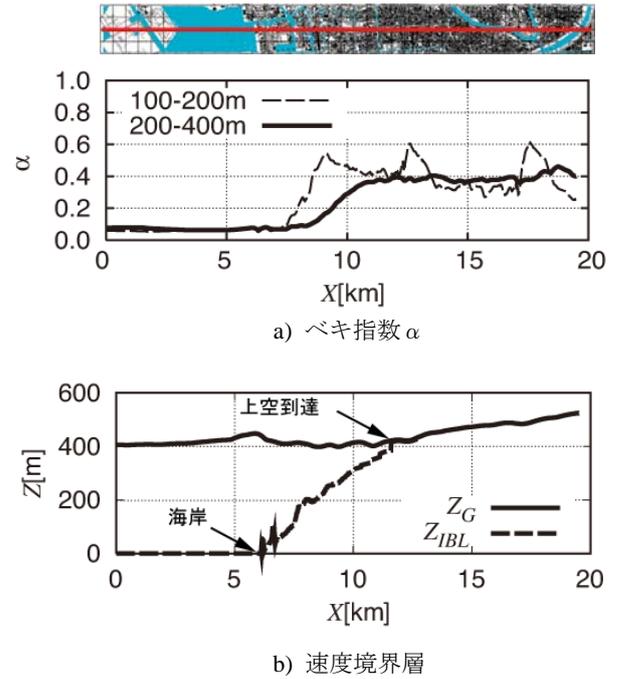


Fig. 8 ベキ指数と速度境界層の風方向の発達
Wind directional development of a) power law index and b) wind velocity boundary layer heights

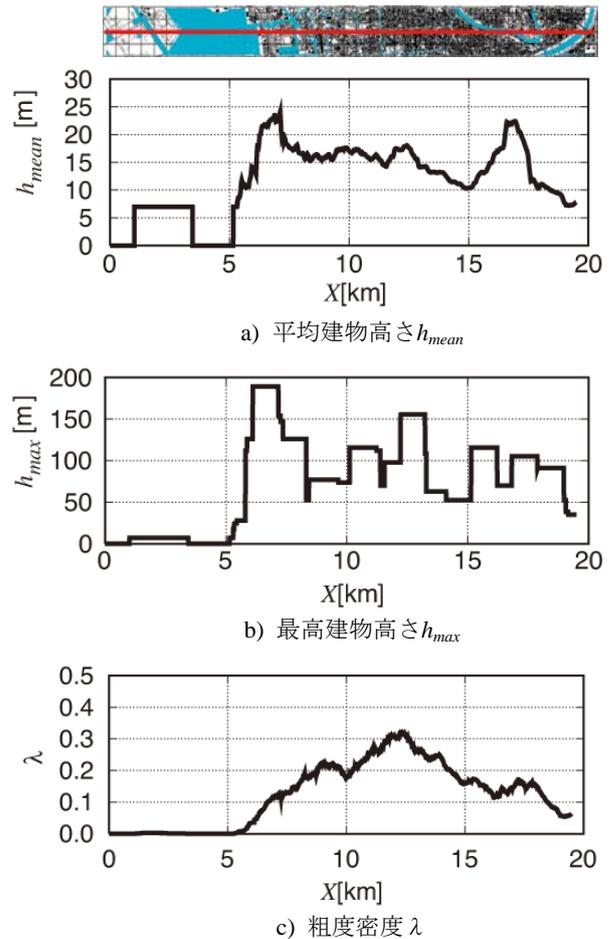


Fig. 9 粗度パラメータの風方向の変化
Wind directional changes of a) mean building heights, b) maximum building heights and c) roughness density

評価となっている。

次式に示す岸田らの予測値を用いた結果を、Fig. 10bに示す。

$$\alpha = 0.11 \exp(3.47\lambda) \quad (5)$$

岸田らの式では、ベキ指数の最大値は約0.4となり、Fig. 8aに近づくものの、 α の分布形状が粗度密度 λ の分布に大きく依存している。岸田らは、粗度密度 λ と建物高さのばらつきに一定の相関がある事に着目して、(5)式のように α が λ のみの関数とした。しかし一方で(5)式右辺の λ にかかる係数3.47は、粗度高さの均一さの度合いに応じて変化すると考察している。

Fig. 7に示したように一様な高さを想定した場合には、粗度密度が0.1を上回ると、Skimming flowが形成されて粗度長はむしろ小さくなる。しかし粗度高さが不均一な場合には、義江ら⁹⁾の実験結果にもあるように、周りよりも高い建物に気流が衝突する事で、地表付近に気流が到達する。岸田らの考察のとおり、建物高さにばらつきがある実在市街地では、粗度密度 λ が0.1を超えても必ずしもSkimming flowの形成につがる訳ではない。従ってベキ指数の評価には粗度密度 λ だけではなく、建物高さのばらつきの影響を、岸田らのように λ を介するのではなく、評価式中に直接取り込む必要があると考える。

3.4 ベキ指数推定式の提案

はじめに建物高さが均一で、かつ対象領域内の建物高さのみで粗度密度 λ が変化する場合を考える。この場合(3)の近似式は以下のように変形できる。

$$\begin{aligned} z_0 &\propto h^2 & \lambda < 0.1 \\ z_0 &= \text{const.} & \lambda \geq 0.1 \end{aligned} \quad (3')$$

すなわちRaupachらのモデルでは、粗度密度が0.1以下では粗度長は粗度高さの2乗に比例し、粗度密度が0.1を超えると粗度長は一定の値で頭打ちとなる。

そこで、粗度密度が0.1を超えても粗度長は建物高さのばらつきの度合いに応じて増加すると考え、(3)式に修正を加える。そして不均一な粗度高さを持つ実市街地の粗度長を求める式として次式を提案する。

$$\begin{aligned} z_0/h_{\max} &= \lambda & \lambda < 0.1 \\ z_0/h_{\max} &= 0.01\lambda^{-1} + \frac{h_{\max} - h_{\text{mean}}}{h_{\max}} \lambda & \lambda \geq 0.1 \end{aligned} \quad (6)$$

すなわち、粗度密度 λ が0.1を超えるところでは、最大建物高さ h_{\max} と平均建物高さ h_{mean} の差に粗度密度を乗じた値に応じて、粗度長が増加するとした。均一な建物高さの場合には、従来のRaupachのモデルとなる。一方、粗度長からベキ指数への変換には、従来どおりCounihanの式を使う。ただし流入境界で与えたベキ指数 $\alpha = 0.1$ を下限值とした。

Fig. 11aに(6)式と(4)式を用いて評価したベキ指数 α の分布を示す。ベキ指数の値は陸上ではほぼ0.4となり、Fig. 11cのLES結果から得られた内陸部での α と対応する。ただし、格子点での粗度の情報に基づく評価では、臨海部

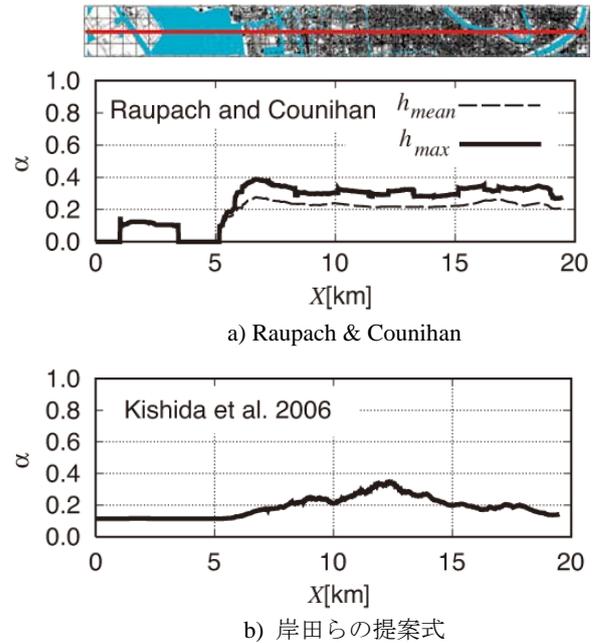


Fig. 10 ベキ指数 α の予測値
Estimations of power law index α a) by Raupach & Counihan and b) by Kishida et. al.

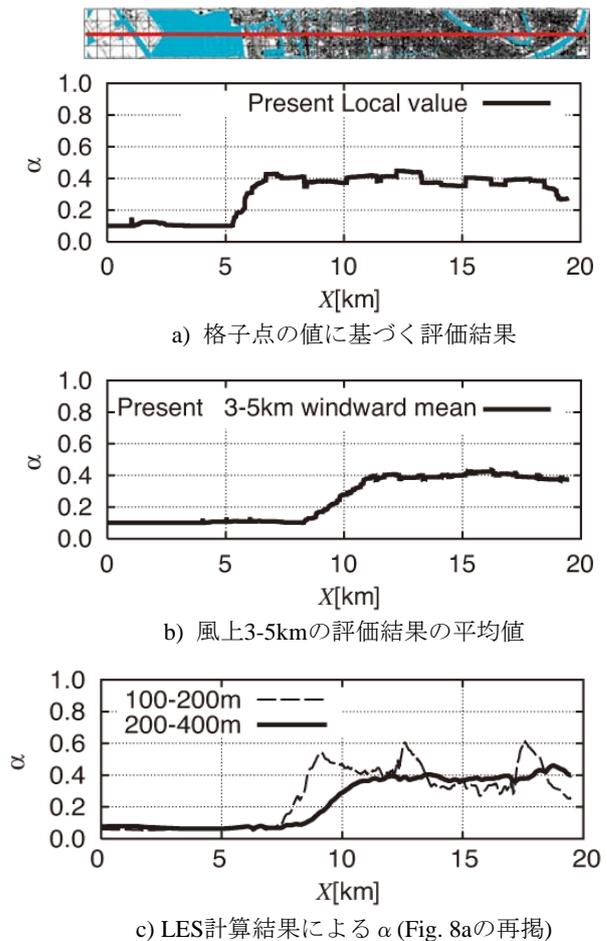


Fig. 11 提案式によるベキ指数 α の予測値
Present estimations of power law index α a) by local grid point values, b) by averaging 3-5km windward values and c) LES results (reprint of Fig. 8a).

から急激にベキ指数が立ち上がり、上陸後しばらくしてから緩やかに立ち上がるLES結果とは異なる。

Fig. 8bによれば、高度200-400mの範囲に内部境界層が到達するのは、海岸から3-5km風下の位置である。そこで、ベキ指数の評価位置から風上3km, 4km, 5kmの三カ所の粗度密度および建物高さからそれぞれベキ指数を推定し、これら三個の単純平均をとることで評価地点のベキ指数とした。Fig. 11bにその結果を示す。Fig. 11cの高度200m-400mのベキ指数の変化を再現できている。

4. まとめ

建物高さが不均一な市街地上空で発達する平均風速鉛直分布のベキ指数を、粗度パラメータから推定する方法について、実在市街地を対象としたLES計算結果から提案した。本論文で得られた知見を以下にまとめて示す。

- 1) 南北19km, 東西1kmの領域に対して、水平格子解像度10mでLES解析を行った。海(南)側からの流入気流の鉛直分布をベキ指数 $\alpha=0.1$ とおいたところ、内陸部の高度200-400mではベキ指数 $\alpha=0.4$ の鉛直分布が得られた。高度100-200mでは、同高度に達する建物の影響で、局所的に大きなベキ指数となる。
- 2) 海岸から発達する内部境界層高さは、海岸から約5kmで流入気流の境界層高さに達する。
- 3) 計算領域内にあるドップラーライダーシステムによる観測結果から、南よりの風向で大気の中立状態にあると考えられる時間帯の平均風速の鉛直分布を比較すると、LES結果と観測値は良く一致していた。
- 4) Raupachらの手法に従って計算領域内の粗度密度 λ から粗度長を求め、Counihanの式に従ってベキ指数を評価したところ、LES結果に対して過小評価となった。
- 5) そこで、粗度密度 λ が0.1を超える領域で建物高さのばらつきを考慮するため、最高建物高さ H_{max} と平均建物高さ H_{avg} を用いた粗度長の評価式(6)を提案した。さらに評価地点の風上3km, 4km, 5kmそれぞれのベキ指数を算出して、これらの単純平均で得られたベキ指数は、LES結果と良く一致した。
- 6) 本提案式を用いれば、LES解析を行わなくても、実在市街地上空での平均風速鉛直分布のベキ指数が推定できる。ただし粗度密度の評価を行う領域の大きさの影響や、より地表に近い高度でのベキ指数の評価法については、さらなる検討が必要である。

謝辞

本報告は、科学研究費補助金基盤研究B(22360224)「都市域建物を対象としたCFDに基づく耐風設計のイノベーション」の助成を受けた研究成果の一部をまとめたものです。研究代表者である東京工業大学・大学院総合理工

学研究科田村哲郎教授には、多くの助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説, p. 22, 丸善, (2004)
- 2) 中村修：都市の土地利用数値情報を用いた風速鉛直分布の評価方法に関する研究, 東北大学学位論文, (2001)
- 3) 丸山敬：平塚市上空の風速分布の数値シミュレーション, 京都大学防災研究所年報 No.41, pp.287-292, (1998)
- 4) 丸山敬：接近流の気流性状および地表面粗度形状が市街地上空の乱流境界層に及ぼす影響について, 日本建築学会大会講演梗概集B-1, pp.99-100, (2002)
- 5) 片岡浩人, 他：RANSおよびLESに基づく高層建物群交流域の特性に関する予測評価 風洞実験結果との比較検討, 第19回風工学シンポジウム論文集, pp.73-78, (2006)
- 6) 岸田岳士, 他：都市細密データより地表面被覆形状を再現した実在都市域における風速の鉛直分布-LESによる検討-, 第19回風工学シンポジウム論文集, pp.37-42, (2006)
- 7) Raupach, M. R., et al. : Rough-wall Turbulent Boundary Layers, Applied Mechanics Review, Vol. 44, pp.1-25, (1991)
- 8) Counihan, J. : Adiabatic Atmospheric Boundary Layers: A review and analysis of data from the period 1880-1972," Atmospheric Environment, Vol.9, pp.871-905, (1975)
- 9) 義江龍一郎, 他：高密度市街地における建物群の形態が歩行者レベルの風速・気温分布に与える影響, 日本建築学会環境系論文集 Vol.73, No.627, pp.661-667, (2008)
- 10) 片岡浩人, 他：風環境シミュレータ「Zephyrus(ゼフィルス)」の開発, 大林組研究所報, No.64, pp.49-54, (2002)
- 11) 吉田智哉, 他：ドップラーソーダを用いた地表面粗度の異なる地点の風速の鉛直分布に関する研究 その22市街地モデルの風洞実験, 日本建築学会大会講演梗概集B-1, pp.85-86, (2003)
- 12) 片岡浩人, 他：流入変動風を用いた三次元角柱周りの気流解析, 日本建築学会計画系論文集, No.523, pp.71-77, (1999)
- 13) 大塚清敏, 他：小型ドップラーライダー観測による境界層の日変化, 日本建築学会大会講演梗概集B-1, pp.93-94, (2010)

本論文で使用した地図データの許諾番号：Z09KA第039号(ゼンリン)