# LES による市街地上空鉛直気流分布の予測

# Numerical Predictions of Vertical Wind Velocity Profiles over An Urban Area by LES

广岡浩人,大林組,東京都清瀬市下清戸 4-640, kataoka.hiroto@obayashi.co.jp
田村哲郎,東工大,神奈川県横浜市緑区長津田 4259, ttamura@depe.titech.ac.jp
Hiroto KATAOKA, Obayashi Corp., 4-640 Shimokiyoto, Kiyose-shi, Tokyo
Tetsuro TAMURA, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuda, Midori-ku, Yokohama

The vertical wind velocity profile dominates wind loadings acting on tall buildings. Building code prescribes profiles according to terrain conditions. The effects of terrain conditions can be treated by the surface roughness, however, the urban area has uneven distributions of roughness. LES computations are conducted to predict vertical wind velocity profiles over an existing urban area. The effects of roughness density parameter to the profiles and the developments of internal boundary layer height from the coast are discussed. The results are compared with observation data obtained by a Light Detection And Ranging system at neutral conditions as well.

# 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<sup>(1)</sup>では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「III:中層建築物(4~9階)が散在している地域」、「V:中層建築物(4~9階)が主となる市街地」といった粗度区分に関する説明からだけでは、一義的に判定する事が難しい場合も多い。滑面側の粗度区分を選定することで、構造骨組み風荷重に対して安全側の評価が得られるが、例えば風揺れ居住性改善のための制振装置選定の場面では、粗度区分の違いが装置の性能に大きく関わってくる。

中村<sup>(2)</sup>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べき指数に与える影 響を調べている。それによると、べき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。ただし観測値はゼロ面変異を考慮 しても、提案式や指針式に示される値よりも大きなべき指数を とる場合があるとしている。

丸山<sup>(2)</sup>は RANS 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べき指数を求めた。 ただし水平格子解像度度は 70m で、市街地は体積密度、表面積密度、抵抗係数、乱れ流さスケールで構成される都市キャノピーモデルで再現している。台風通過時の観測結果との比較は比較的良い一致を示している。さらに丸山<sup>(4)</sup>は 5 種類の仮想市街地を対象とした解析を行って、市街地上空での内部境界層の発達について考察を行っている。内部境界層の発達は市街地タイプや建築面積率の影響を受けないこと、べき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べき指数に与える市街地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<sup>(5)</sup>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 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<sup>60</sup>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、平均風速分布のべき指数と粗度密度 $\lambda$ (調査対象地 域の面積に対する粗度要素の風に対する見附面積の総和)との 関係を調べている。Raupach らの提案式<sup>70</sup>と Counihan の式<sup>60</sup>を 用いて、粗度密度 $\lambda$ から粗度長 Z<sub>0</sub>を介して求めたべき指数と、 計算結果のべき指数を比較したところ、計算結果は大きめの値 を示している。これは建物高さのばらつきが原因であるとし、 新たにべき指数と粗度密度 $\lambda$ の関係式を提案している。

以上の既往の研究からは、建築面積率や粗度密度などが平均 風速の鉛直分布の支配因子であるが、実在市街地の上空では、 一様な粗度の分布を仮定した場合よりも大きなべき指数となる ことを示している。ただし観測結果との比較が少なく、さらな る検証が必要であると考える。

そこで、東京臨海部から都心に向かう南風を対象とし、実在 市街地上空の平均風速鉛直分布の評価を LES で行い、各種因子 との関係を示す。また観測結果との比較を行い、予測精度を検 証する。

### 2. 解析手法

#### (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 南端として東西2km×南北19.5kmの領域を解析対象とした。 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。また地形 の影響は無視した。

(2) 数值解析手法

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。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、個々の建物からのはく離 せん断層の詳細な予測は不可能であるが、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<sup>99</sup>、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。

### 第 24 回数値流体力学シンポジウム D3-1



Fig. 1 Objective domain (left) and building models (right.) Red dot denotes the observation site. © 2010 ZENRIN CO., LTD.(Z09KA 第 039 号)

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。

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

吉田ら<sup>(10)</sup>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*<sub>G</sub> は 400m、べき指数 α=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<sup>(1)</sup>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・各収束計算毎に、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 $U(z_G)$ =1.0m/s、時間刻み $\Delta t$ =1s とし、対象 領域の統計量は 42,000 ステップ分の計算のうち、後半 32,000 ステップの値から求めた。

# 3. 計算結果

(1) 流れ場の計算結果



Fig. 3 Instantaneous distributions of scalar wind velocity (z=105m, 5m and vertical section.)



Fig. 4 Time-averaged distributions of scalar wind velocity (z=105m, 5m and vertical section.)



Fig. 5 Evolutions of vertical profiles along wind-directional center line.

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。

(2) 鉛直分布の風方向への変化

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 は海岸から内意陸への遷移、10km 以降は内陸部である。 Fig. 5b の平均風速分布より、海岸から内部境界層が発達しはじ め、海岸から約 5km 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

# 第 24 回数値流体力学シンポジウム D3-1

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。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。高度100m~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。

(3) 粗度パラメータの分布と鉛直分布の変化

粗度パラメータの分布を Fig. 6b~6d に示す。各値は、計算領域の風方向中心線に沿って各格子点の周囲 1km×1kmの領域内に存在する建物から求めた値である。

平均建物高さ(Fig. 6b)は東京湾埋め立て地で約7mとなっ た後、一旦海上に出て0となる。再上陸後、臨海部の高さ約200m の高層集合住宅地帯の影響を受けて25m付近にまで急激に上 昇する。その後の内陸部では中規模建物の影響で平均高さが低 下するものの、隅田川沿いの高層事務所ビルや中高層の集合住 宅によって再び上昇する。そして領域最北端の荒川に到達し、 平均建物高さは低下する。最高建物高さ(Fig. 6c)では、臨海 部の高層集合住宅地帯でピークを示す。

一方で粗度密度パラメータ $\lambda$ の分布は建物高さの分布とは 異なり、建築面積率が高いと思われる内陸部でピークを示して いる。ただし粗度長が極大値となる $\lambda = 0.1$ を超える事から、 Raupach らの提案式<sup>の</sup>に従うと粗度長は内陸部で小さくなる。

Fig. 6e~6f は計算結果から求めた鉛直分布で、Fig. 6e に示す 境界層高さから、内部境界層高さが上空に達するのは海岸から 約5km 内陸であることが確認できる。Fig. 6f は、各地点の高度 100-200m と 200-400m の各区間で平均したべき指数αの変化で ある。内部境界層の上昇に従って、各高さのべき指数は増加し、 両高度ともにおおむね0.4 程度の値を示す。ただし、100-200m では、同高度に達する建物の影響が見られる。

Fig. 6g は岸田ら<sup>(0)</sup>の提案式による、べき指数の評価結果であ る。岸田らは複数の実在市街地をもとに、建物高さの分布がラ ンダムな状態でべき指数を評価している。ピークの値は約 0.4 で、今回の解析とほぼ同等であるが、全般的に評価結果は低め の値を示している。提案式は粗度密度λだけからべき指数を求 めているので、予測されたべき指数の分布は Fig. 6d の分布形状 に影響されている。しかし Fig. 6f のべき指数分布には建物高さ による影響が見られる。岸田らは、粗度高さが一定でない場合 のべき指数αについて、粗度密度λが大きい所では粗度高さの ばらつきも大きくなる傾向をふまえて、粗度密度λの関数とし て求める事としている。しかし本計算結果によるとランダムな 粗度高さの分布では、粗度密度λだけによる推定には限界があ り、建物高さの考慮が必要と考える。

#### 4. 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、小型ドップラーライダーによる観測値<sup>(12)</sup>を用いる。

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. 7 に示す。観測値は地

Table 1 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 Roughness parameters, boundary layer heights and power law index along windward centerline.

20

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。

吉田らは、Fig. 5a に示す点 16 番から約 1.5km 東側の地点で ドップッラーソーダによる観測値を行っている。それによると、 南より(SSE-S-SSW)の風向時のべき指数は約 0.3 となり、今 回の結果と比べて低い値を示している。これは、測定点の南側 には、東京湾から隅田川の河川敷に沿った気流が南北に吹く領 域が含まれており、当該区間でべき指数が低下している事が原 因であると考えられる。

# 5. まとめ

実在市街地上空で形成される平均風速の鉛直分布の評価を 目的とし、東京湾から北に19.5km までの領域を対象とした LES を行った。結果をまとめると以下のとおりである。

- ・海岸から約5kmの地点で内部境界層高さは接近流の境界層 頂部に達する。
- ・内部境界層が発達した後では、地上 200-400m における鉛 直分布のべき指数は約0.4 となった。
- ・粗度密度を用いた岸田らの提案式は、べき指数が小さめに 見積もられた。粗度高さの分布が不均一な市街地では、粗 度密度だけによる推定には限界があると考える。
- ・計算量域内におけるドップラーライダーの観測値から、南 風強風時の値を抽出し、計算結果との比較を行った。その 結果、地上500mまでの平均風速分布はよく一致した。

### 謝辞

本研究は科学研究費補助金基盤研究B(22360224)の助成を 受けたものである。

# 参考文献

- 日本建築学会、"建築物荷重指針・同解説、":(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、"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, B-1, (1998), pp.287-292.
- (4) 丸山, "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, (2002), pp.99-100.
- (5) 片岡,田村,奥田,大橋, "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, (2006), pp.73-78.
- (6) 岸田,田村,奥田,喜々津,"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,



Fig.7 Comparison between present results and observation data.

(2006), pp.37-42.

- (7) Raupach et al., "Rough-wall Turbulent Boundary Layers," Appl. Mech. Rev., Vol. 44, (1991), pp.1-25.
- (8) Counihan, J., "Adiabatic Atmospheric Boundary Layers: A review and analysis of data from the period 1880–1972," Atmos. Environmrnt, 9, (1975), pp.871-905.
- (9) 片岡,川口,木梨,"電子地図情報を用いた街区の風環境シ ミュレーション,"日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, (2001), pp.791-792.
- (10) 吉田ら、"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,"日本建築学会大会 講演梗概集 B-1,(2003), pp.85-86.
- (11) 片岡,水野,"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 (1999), pp.71-77.
- (12) 大塚、後藤、川口、"小型ドップラーライダー観測による境 界層の日変化,"本建築学会大会講演梗概集 B-1, (2010), pp.93-94.

本論文中に使用した地図データの複製利用許諾番号 © 2010 ZENRIN CO., LTD.(Z09KA 第 039 号)