

## 都市域における大気境界層内の乱流構造に対する LES 解析 LES Analysis on the Structure of Turbulent Flow over Urban Area

○吉田敏哉・竹見哲也

○Toshiya Yoshida・Tetsuya Takemi

The variability and structure of turbulent flows over urban area are influenced by the surface roughness, i.e., buildings and man-made structures. Turbulent flows in real cities have been studied by both observations and simulations; however, most of these studies focus on large cities such as Tokyo. Therefore, studying various kinds of real urban areas are needed in order to understand the characteristics and structure of turbulent flows over complex and complicated surface. The purpose of this study is to evaluate the relationship between turbulent flow and real urban roughness by performing large-eddy simulations (LESs) of turbulent flows in Kyoto City.

### 1. はじめに

大気境界層内の大気は地表面からの摩擦や熱の供給により、そのほとんどが非定常な乱流状態になっている。特に構造物が立ち並ぶ都市では、地表面の影響がより強くなるため、都市における大気境界層乱流の性質は十分明らかにされていない。

そこで本研究では京都市を対象に乱流を陽に計算する Large eddy simulation (LES) を行い、乱流に対する都市の影響を解析した。既往研究では東京のような大都市を対象とすることが多いが、国や地域によって都市の形態は様々であり、中規模都市である京都市を解析対象とすることは、都市の乱流構造を把握する上で有用であると考えられる。

### 2. 京都市の特徴

まず、京都市の特徴を示すために、都市の地表面形態を表す代表的な粗度パラメータを用いる。表 1 は平均建物高さ  $H_{ave}$ 、建物高さの標準偏差  $\sigma_H$ 、建物面積の総和と建物を含む単位面積の比  $\lambda_p$ 、建物の風上側面積の総和と建物を含む単位面積の比  $\lambda_f$  を、ヨーロッパの London, Berlin、アメリカの Salt Lake City, Los Angeles (Ratti et al. 2002)、そして東京 (Nakayama et al. 2011) と比較したものである。表 1 から、京都市の  $H_{ave}$  や  $\sigma_H$  はアメリカの都市や東京と比べ小さいことが分かる。同様の特徴はヨーロッパの都市でも見られるが、これは景観保全のため建物高さに強い制限が掛けられているためと考えられる。また、 $\lambda_p$  と  $\lambda_f$  の値は東京よりも大きい。京都市は道が狭く基盤の目状に規則的に建

物が密集して立ち並んでいるためと思われる。

表 1：粗度パラメータの比較 (Ratti et al. 2002, Nakayama et al. 2011)

	London	Berlin	Salt Lake City	Los Angeles	東京	京都
$H_{ave}$	13.6	18.6	16.3	51.3	18.4	11.7
$\sigma_H$	5.0	4.3	14.1	51.5	17.2	7.04
$\lambda_p$	0.55	0.35	0.22	0.28	0.49	0.51
$\lambda_f$	0.32	0.23	0.11	0.45	0.39	0.44

表 1 の粗度パラメータからおおまかな京都市の地表面の特徴が明らかになった。続いて、地表面粗度が流れ場に与える影響を LES の結果より見ていく。

### 3. LES 解析

計算領域は京都市内の南北 11km・東西 2km (図 3)、水平解像度は 4m とし、北風が主流風向となる場合の解析を行った。なお、流入条件には別計算領域で作成した境界層乱流をタイムステップごとに与えている。

本計算領域には京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーが含まれており、この場所では超音波風速計とドップラーライダーによる乱流観測が行われている。そこで、まず LES の整合性を検証するためにこれらの観測データと比較を行っ

た。ここで本研究では大気安定度が中立の場合を対象としているため、安定度の指標 $z/L$ が $-0.05$ から $0.05$ のときを中立として、観測データを選別した。 $z$ は高度[m]、 $L$ はモニンオブコフの長さ[m]である。

上記の条件から、2013年6月8日19時30分から2013年6月8日20時00分の30分間のデータを選出し、LESと比較した。図1は平均風速の鉛直プロファイルの比較である。縦軸、横軸ともに対数軸となっている。観測とLESでは風速の大きさや境界層の厚さが異なるため定量的な比較はできないが、高度100m以下で、それぞれの傾きは $1/3$ 乗に沿っている。大気境界層内の風速鉛直プロファイルは経験的に高度のべき乗に比例することが分かっており、都市域のべき指数は $1/4$ から $1/3$ 程度を取るとされているので、LESは観測結果を定性的によく再現できているとともに、都市の影響を表現できていることが分かる。

次に、図2は観測点の位置から上流側約4kmと9kmの位置での風速の鉛直プロファイルと比較したものである。それぞれのおおよその位置は図3に示すとおりで、上流側4kmは鴨川上空、上流側9kmは京都市下京区上空になる。上流側9kmでは密集した建物の影響を受け風速の鉛直シアーが大きくなっているのが分かる。一方、上流側4kmでは粗度の影響がなくなるため、下層の風速が大きくなっている。また、観測点での下層の風速は鴨川上空のプロファイルより減衰しており、鴨川より風下側の粗度の影響を受けたことが分かる。また、それぞれのプロファイルは高度100mあたりで差が見られなくなる。つまり、地表面の影響を大きく受ける高度が100m以内の流れ場であるといえる。

以上より、観測との比較からLESの整合性が確かめられ、また、京都市内での風速プロファイルの特徴を捉えることができた

図3: LES計算領域内の建物高さ[m]分布。四角印は観測点、白抜き丸印は観測点から上流側約4km、色つきの丸印は観測点から上流側約9kmの地点。

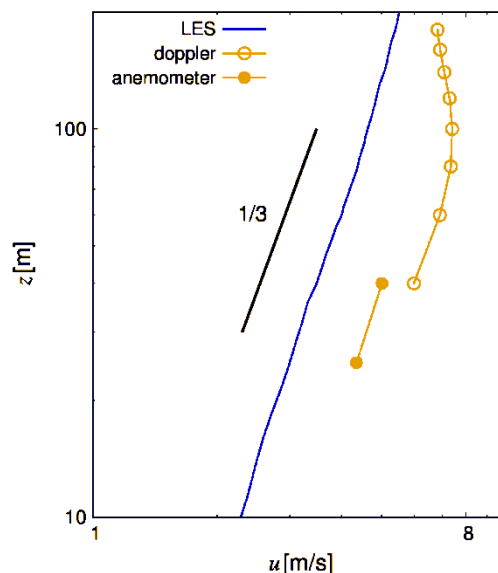
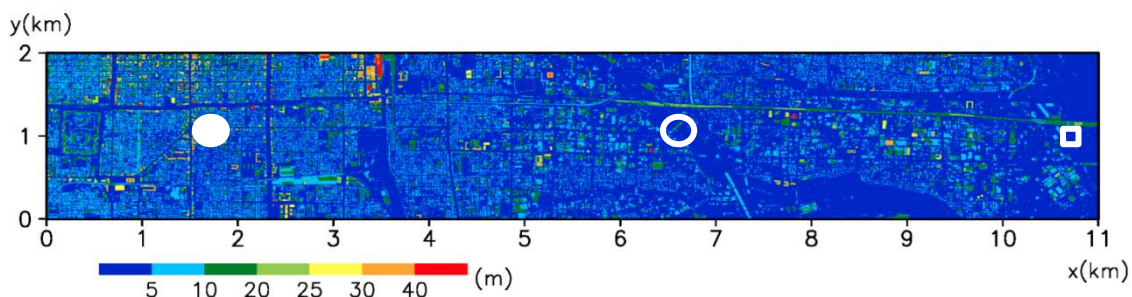


図1: LESと観測の風速鉛直プロファイルの比較。青線はLES、白抜き丸印はドップラーライダー、色つきの丸印は超音波風速計の値を示す。

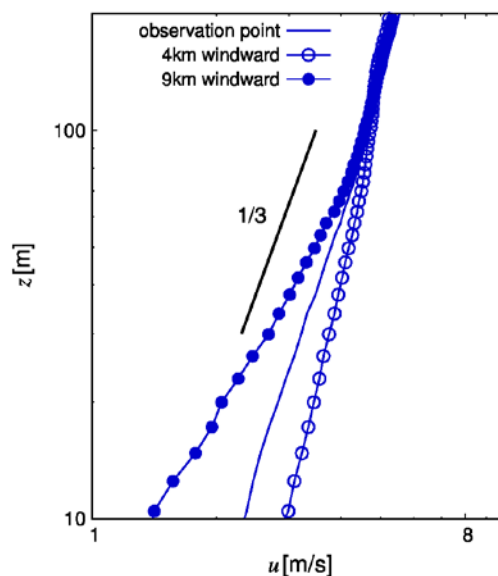


図2: LESにおける風速鉛直プロファイルの空間変化。青線は観測点、白抜き丸印は観測点から上流側約4km、色つきの丸印は観測点から上流側約9kmの値を示す。