

格子ボルツマン法を用いた 東京23区都市街区シミュレーション

Database of Canopy Layer Turbulent Flow Statistics in Tokyo 23 Wards
Reproduced by Using Lattice Boltzmann Method

稻垣厚至¹⁾，神田学²⁾，小野寺直幸³⁾，長谷川雄太⁴⁾，渡辺力⁵⁾

Atsushi Inagaki, Manabu Kanda, Naoyuki Onodera, Yuta Hasegawa and Tsutomu Watanabe

1) 博(工) 東京科学大学 助教 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1, E-mail: inagaki.a.ab@m.titech.ac.jp)

2) 博(工) 東京科学大学 教授 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1, E-mail: kanda.m.aa@m.titech.ac.jp)

3) 博(工) プロメテック・ソフトウェア株式会社 テクニカルマネージャー (〒113-0033 東京都文京区本郷三丁目34番3号 本郷第一ビル8階, E-mail: onodera.naoyuki@prometech.co.jp)

4) 博(工) プロメテック・ソフトウェア株式会社 シニアエンジニア (〒113-0033 東京都文京区本郷三丁目34番3号 本郷第一ビル8階, E-mail: hasegawa.yuta@prometech.co.jp)

5) 博(理) 北海道大学 教授 (〒060-0819 北海道札幌市北区北19条西8丁目, E-mail: t-wata@lowtem.hokudai.ac.jp)

Numerical simulations of a developing turbulent boundary layer over the 23 wards of Tokyo were performed using the lattice Boltzmann method in conjunction with a large-eddy simulation (LES) model. The computational domain spans $35\text{ km} \times 35\text{ km}$ in the horizontal directions and is partitioned into 17 subdomains along the spanwise direction. Independent simulations for each subdomain were conducted on the TSUBAME3.0 supercomputing system. The largest subdomain covers a horizontal area of $2.5\text{ km} \times 32\text{ km}$ and is discretized using uniform cubic grids with a resolution of 2 meters. The simulation results reveal that the mean wind speeds near the ground in urban areas are primarily governed by the plane area index, rather than by the aerodynamic roughness length. Moreover, the influence of the developing boundary layer becomes negligible beyond a few kilometers from the inlet. These findings indicate that the local flow characteristics are predominantly determined by the surrounding urban morphology and are largely unaffected by upstream structures or the flow conditions in the upper atmospheric layer.

Key Words : Lattice Boltzmann Method, Canopy Layer, Tokyo 23 wards, Local Turbulence Statistics

1. はじめに

都市街区の流れは、上空で発達する乱流境界層の擾乱と、周囲の街区幾何構造による直接作用を受けている。これらの相互作用について、数値シミュレーションを用いて評価するためには各々の物理過程を陽に取り扱う必要がある。しかしながら各現象の長さスケールの比は $10^{5\sim 6}$ 以上離れているため、それを再現するには大規模な計算資源と、それを効率的に活用できる計算手法が必要である。格子ボルツマン法は流体運動を数値的に取り扱う手法の一種である。従来多く使われているNavier-Stokes式に基づくモデルと比べ、特にGPGPUの利用において、高い計算効率を発揮できている[1]。

本研究では格子ボルツマン法を用いて、発達する都市乱流境界層の計算を実施し、境界層構造と街区構造が、地表面近傍の流れ場に及ぼす影響について検討を行った。計算対象として、東京都23区全域について、個々の建物形状を陽に解像した大規模な計算を実施した。

2. 格子ボルツマン法LESモデル

格子ボルツマン法はBoltzmann方程式に基づき流体運動を記述する方法である。この手法では、計算格子内の流体を構成する粒子群の動きについて、離散化された速度

分布関数で表現し、その時間発展をBoltzmann方程式に基づき計算するものである。

本モデルではD3Q27モデル、単一緩和時間係数のモデル(BGKモデル)を用いている。サブグリッドスケールの乱流応力について、coherent structure Smagorinsky model[2]で表現されるSGS渦粘性を、緩和時間係数に含まれる動粘性にしている。剛体面では対数則の壁関数を用い壁面抵抗を表現し[3]。植生として定義される格子内では、そこを通過する流体に対してバルク係数で表現された抵抗を付加した[4]。

3. 計算設定

(1) 地表面データ

地表面条件として、建物凹凸、標高、樹木の分布を考慮した。建物凹凸モデルにはCAD CENTER社のMAPCUBEを利用した。標高モデルには国土地理院が提供する5m解像度の細密地図情報を利用した。樹木の分布は地表面のRGB画像から機械学習と目視による修正に基づき抽出した。それぞれGISのソフトを用いて2m空間解像度のメッシュデータに成形した。

(2) 計算条件

本研究では建物で隔てられた、都市地表面近傍の流れ

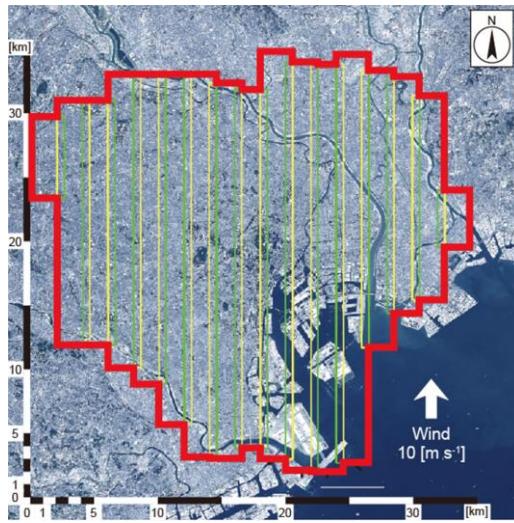


図-1 地表面条件 赤枠内が全計算領域
緑と黄の枠は分割実行される計算領域を示す

について検討するものであり、個々の建物を陽的に解像するため格子間隔を2mとした。今回の計算対象である東京都23区（図-1）は東西南北それぞれ35km程度の広さを持正在おり、2m格子で解像するには膨大なメモリが必要である。そこで本研究では、ある主流風向（南風）に対して、スパン方向に計算領域を17分割し、それぞれ独立した計算を実施して結果を合成し、東京23区全域の街区内部風速分布を得た。

4. 結果

全計算領域を水平方向に320m×320mの小領域に分割し、その中で地表面幾何パラメータと、高度2mの平均風速や境界層高度などの風速統計量を計算し、各々の対応関係について検討した。図-2は各種統計量の水平空間分布を示したものであり、上記の小領域における建蔽率、平均建物高さ、境界層高度、高度2mの平均風速の平均値を示している。平均建物高さは都心部に集中して大きな値になっているが、建蔽率の分布にはそれほど大きな偏りは見られず、大きな公園や緑地などがあるところで低い値になっている。

次に境界層高度を見てみると、南風一様風の計算条件に基づき南側が低く、北に行くに従い単調増加している。地表面粗度定数のような空力パラメータについては、流体シミュレーションに基づく平均風速分布から算出されるものの境界層高度とはほぼ無関係であり、平均建物高さに近い分布を持つことを確認している（図割愛）。

高度2mの平均風速については建蔽率の分布に近いことが図より確認できる。これまでの研究において、対数層が成り立つ接地境界層の流れは粗度定数や平均建物高さに強く依存した空間分布を持つことが指摘されている[5]。一方、都市街区内の地表面近傍の風速については、接地境界層の特性よりも建蔽率で表現されるような周囲の建物幾何配列の特性により強く規定されていることを、本研究結果は示している。

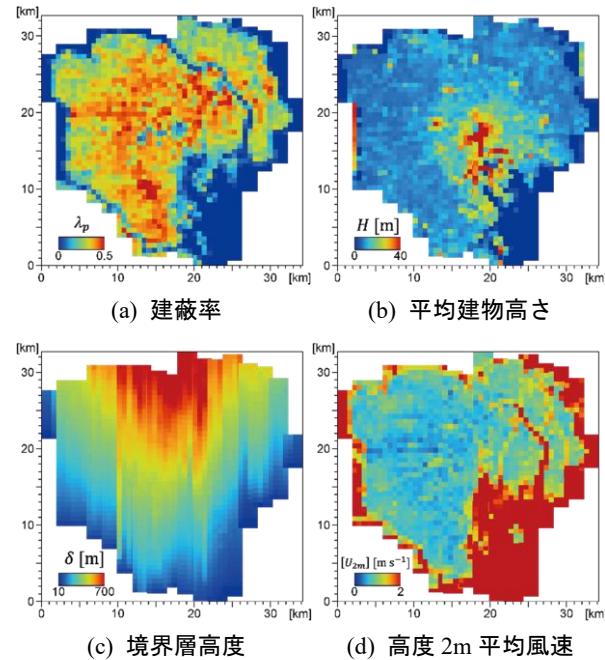


図-2 320m×320mの正方形タイルで平均した
地表面幾何パラメータ及び流れの統計量

5. まとめ

本研究は、都市街区の流れに対する上空の流れの影響と、観測点周囲の局所的な都市街区幾何の影響を明らかにするために、両スケールを包含するような大規模な乱流境界層の計算を行った。その結果から、上空の流れは粗度のようなバルクな空力パラメータに強く依存するが、都市地表面近傍では建蔽率による流れの阻害効果などが主に寄与していることを明らかにした。

謝 辞：本研究はJSPS科研費 21H04573, 20H02253, 22H03599の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Onodera et al. (2013) Large-scale LES wind simulation using lattice Boltzmann method for a 10 km × 10 km area in metropolitan Tokyo. *Tsubame ESJ* 9:2–8
- [2] Kobayashi (2006) Large eddy simulation of magnetohydrodynamic turbulent channel flows with local subgrid-scale model based on coherent structures. *Phys Fluids* 18:045107
- [3] Han et al. (2021) A wall function approach in lattice Boltzmann method: algorithm and validation using turbulent channel flow. *Fluid Dyn Res* 53(4): 045506
- [4] Watanabe et al. (2020) Large-eddy simulation of neutrally-stratified turbulent flow within and above plant canopy using the central-moments-based lattice Boltzmann method. *Boundary-Layer Meteorol* 176, 35–60
- [5] Ahmad et al. (2017) Large eddy simulation of the gust index in an urban area using the lattice Boltzmann method. *Boundary-Layer Meteorol* 163(3), 447–467