

数値乱流データベースを用いた統計的ダウンスケーリングによる街区内乱流場の即時診断

稲垣 厚至* 小野寺 直幸** 長谷川 雄太** 小田 僚子*** 小野 嘉己** 児島 風沙***

* 東京科学大学 ** 株式会社プロメテックソフトウェア *** 千葉工業大学

1. 目的

都市街区内（地表面近傍の建物で隔てられた空間）の風環境は都市で生活する人々の生活環境と密接に関わっている。日常の暑熱環境や物質濃度の動態への影響、気象場へのフィードバック、台風等がもたらす突風災害、あるいは都市での無人航空機に対する影響など、街区毎の風況特性を把握することは重要である。

都市街区の流れの分析には数値流体力学（CFD）モデルの利用が効果的であるが、日々の天気予報のような運用方法に対しては計算コストが膨大であり、省力化は必須である。そこで本研究では、街区内風況に関する CFD シミュレーションデータベースに基づくダウンスケール手法を開発し、領域気象モデルと結合して街区内風環境の即時診断・予測を行う。

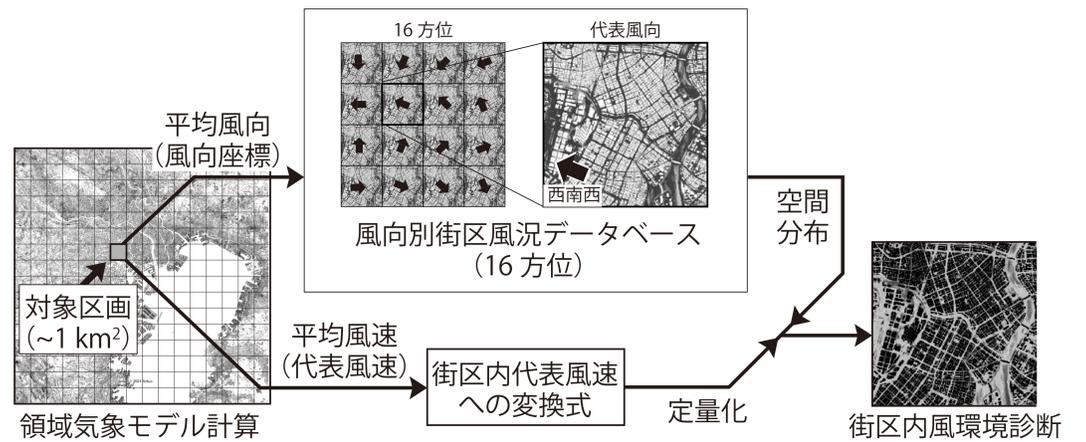


図1 都市街区内の風環境診断・予測のためのダウンスケールシステム概要

2. ダウンスケール手法

本ダウンスケール手法の概念図を図1に示す。まず計算対象区域の CFD シミュレーションを格子幅数メートルで計算し、街区内の時間平均乱流統計量をデータベースとして蓄積する。計算は風向別を実施する。次に領域気象モデルで水平 1km 程度の気象予測計算を実施し、計算対象区域の代表風速ベクトルを得る。これに対応する風向のデータベースを参照し、風速強度でスケールリングすることで、気象モデル予測計算が算出した代表風速に対応した、街区内風環境を診断できる。

3. 格子ボルツマン法

本ダウンスケール手法では、データベースを一度構築すれば以後 CFD の再計算は必要無いが、そのための計算量は膨大である。例えば東京都 23 区全域を対象とした場合、水平 30km 四方程度を、道幅 10m 程度を十分解像できる格子幅で解像する必要がある。そこでエクサスケール計算機の有望なアーキテクチャの一つである GPU に適した CFD 手法の一つである、格子ボルツマン法（LBM）モデルを構築し [1-5]、都市境界層の乱流計算を行う。図2に東京都 23 区の計算結果（南風）の一例を示す。

4. ダウンスケールのテスト計算、実測値との比較

超音波風速計を都市街区内に設置し、本手法により計算された街区内の平均風速と実測値との比較を行った。ここでは水平 2km 四方程度の大きさを計算対象とし、格子ボルツマン法モデルを用いて 16 方位のシミュレーションを実施した。領域代表風速には観測値を用いた。

図3右は観測地点を示しており、建物近傍や木に囲われるなど周囲環境は様々である。図左はダウンスケールによる推定値（赤）と実測値（青）を示しており、両者変動傾向が一致していることが確認できる。入力値とした領域代表風速（灰）と比べると、それとの単純な線形倍ではなく、また地点毎に異なる値が推定されていることが確認できる。これは風向変化及び空間分布が考慮されているためである。

5. 令和元年房総半島台風がもたらした街区内風速の再現

2019年9月に発生し日本に最接近した、令和元年房総半島台風による街区内強風環境について、本ダウンスケール手法により推定した。図4左は推定された1時間平均風速（黒）及び最大風速（赤）の時系列変化であり、倒木あった地点（図右円中心）の値である。右図は最大風速が記録された時点の周囲の風況場を示している [6]。

6. 今後の展望

今後の展望として、（1）データベース構築のため、東京 23 区の異なる風向のデータベースを整備し、23 区全域を対象とした診断を実施する、（2）領域気象モデルとデータベース内で独立に定義される代表風速をそろえるスケール変換式を構築する、（3）別の都市のデータベース構築のために、既存のデータベースを活用した機械学習などによる更なる省力化を図る。

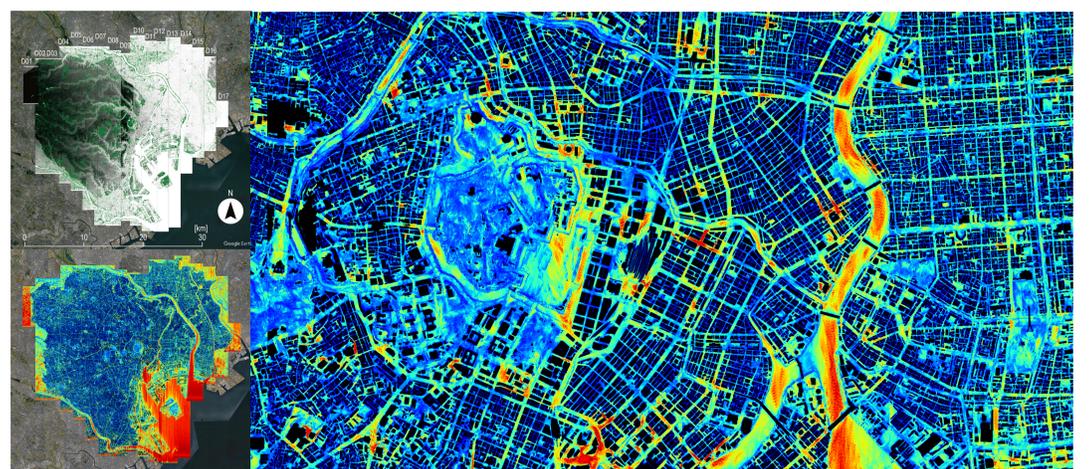


図2 格子ボルツマン法モデルで計算された東京 23 区全域の 2m 高度最大風速の水平分布
領域を東西 17 分割して実施 左上：入力データ（グレー：標高 + 建物高さ、緑：樹木）、
左下：東京 23 区全域最大風速、右：東京駅周辺の最大風速分布

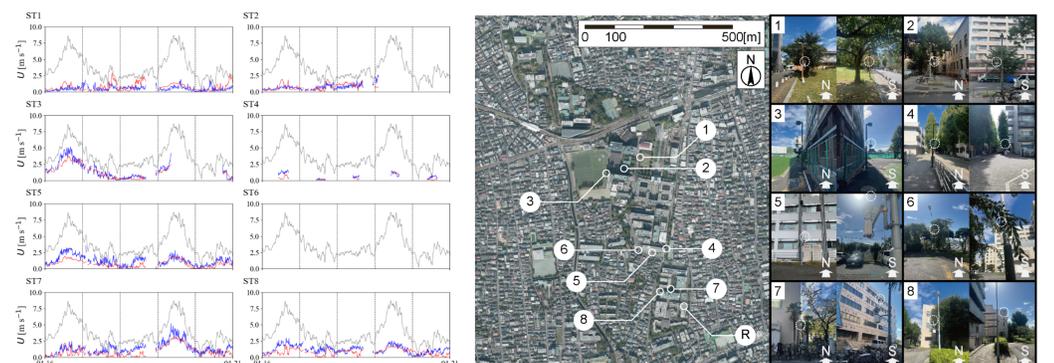


図3 街区内の局所的な 1 時間平均風速の時間変化。左：平均風速の時間変化（赤：推定値、
青：実測値、灰：領域代表風速（入力値））、右：観測地点

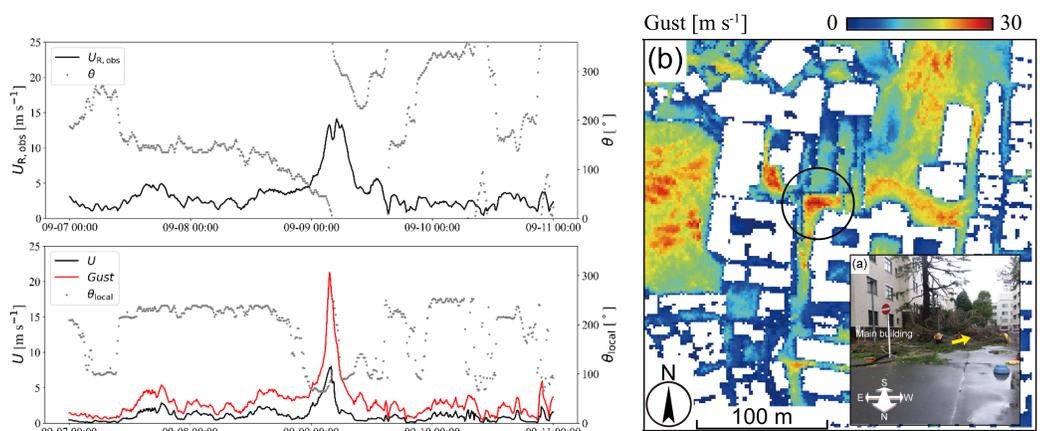


図4 ダウンスケール手法で再現された令和元年房総半島台風通過時の局所風速の時系列変化
（左、測定地点は渦の円中心）と、同地点で最大風速が記録された時の局所最大風速の高度 2m
水平分布（右） [6]

参考文献

- [1] Inagaki A, Kanda M, Ahmad HN, Yagi A, Onodera N, Aoki T (2017) A numerical study of turbulence statistics and the structure of a spatially-developing boundary layer over a realistic urban geometry. *Boundary-Layer Meteorol* 164(2), 161–181
- [2] Inagaki A, Wangsaputra Y, Kanda M, Yücel M, Onodera N, Aoki T (2020) Inner and outer-layer similarity of the turbulence intensity profile over a realistic urban geometry. *SOLA* 16: 120–124
- [3] Onodera N, Aoki T, Shimokawabe T, Kobayashi H (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
- [4] Onodera N, Idomura Y, Hasegawa Y, Nakayama H, Shimokawabe T, Aoki T (2021) Real-time tracer dispersion simulations in Oklahoma City using the locally mesh-refined lattice Boltzmann method. *Boundary-Layer Meteorol* 179, 187–208
- [5] Watanabe T, Shimoyama K, Kawashima M, Mizoguchi Y, Inagaki A (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
- [6] 仲井 花帆, 稲垣 厚至, 神田 学, Dewa G. A. JUNNAEDHI, 長谷川 雄太, 小野寺 直幸 (2025) 乱流統計量の相似性を仮定した街区内風速の動的診断, *土木学会論文集*, 81 巻 16 号, 24-16195