

アンサンブルカルマンフィルタを用いた 都市風況解析のためのパラメータ最適化

Parameter optimization for urban wind simulation using ensemble Kalman filter

小野寺 直幸¹⁾、井戸村 泰宏¹⁾、長谷川 雄太¹⁾、朝比 祐一¹⁾、
稻垣 厚至²⁾、下瀬 健一³⁾、平野 洪賓³⁾、
Naoyuki Onodera, Yasuhiro Idomura, Yuta Hasegawa, Yuichi Asahi,
Atsushi Inagaki, Ken-ichi Shimose, and Kohin Hirano

¹⁾日本原子力研究開発機構（千葉県柏市若柴 178-4 柏の葉キャンパス 148 街区 4, E-mail: onodera.naoyuki@jaea.go.jp)

²⁾東京工業大学（東京都目黒区大岡山 2-12-1）

³⁾防災科学技術研究所（茨城県つくば市天王台 3-1）

We have developed a multi-scale wind simulation code CityLBM that can resolve from entire city blocks to detailed streets. CityLBM enables a real time ensemble simulation by applying the locally mesh-refined lattice Boltzmann method on GPU supercomputers. On the other hand, real-world wind simulations contain complex boundary conditions that cannot be modeled, so data assimilation techniques are needed to reflect observed data in the simulation. This study proposes a hyperparameter optimization of the ground surface temperature bias based on an ensemble Kalman filter to reproduce wind conditions within urban city blocks. As a validation of CityLBM, an Observing System Simulation Experiment (OSSE) is conducted for the central Tokyo area to estimate boundary conditions from observed near-surface temperature values.

Key Words : Particle filter, Ensemble calculations, Graphics-processing-unit-based computing, Lattice Boltzmann method, Urban wind simulation

1. はじめに

都市部は高層ビルが密集した複雑な形状をしているため、都市全域を含む広域の風況場から細かな路地等を捉えたマルチスケールのシミュレーション技術が有効である。これをスマートシティの設計・運用に活用するためには、現実よりも高速な高性能計算技術および確率論的に突風リスク等が評価可能なアンサンブル計算技術の確立が課題となっていた。本研究では、格子ボルツマン法 (LBM) に基づく流体解析手法に対して、GPU を用いた高速計算および局所細分化 (AMR) 格子法による省資源計算の実現により、乱流の不確実性を考慮したリアルタイムのアンサンブル風況シミュレーション手法 CityLBM を開発した [1][2]。

一方、現実の風況シミュレーションにおいては、数値流体力学 (CFD) 解析だけではモデル化できない複雑な境界条件等を含むため、観測データをシミュレーション内に適切に反映するためのデータ同化技術が必要となる。本研究では、アンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) と呼ばれるデータ同化手法を用いて、支配方程式内のハイパーパラメータを最適化することで、現実の風況を反映したシミュレーションの実現を目指す。CityLBM の検証として、東京都心部の建物・地形・植生を設定した条件において、地表面温位に対してバイアス誤差が含まれていると仮定し、地表面近傍の温位の観測値からその値を推定する、観測システムシミュレーション実験 (OSSE) を実施する。

2. CityLBM コード

(1) 格子ボルツマン法

CityLBM コードは、非圧縮流体の弱圧縮近似解法である LBM に基づいて風況解析を行う。LBM は連続体である流体を格子上を並進・衝突する仮想的な粒子の集合と仮定し、格子上の粒子の速度分布関数について時間発展方程式を解く手法である。空間は等間隔の格子上で離散化され、有限個の速度を持つ粒子は並進運動により 1 タイムステップ後に格子点上に位置するため補間に伴う離散化誤差を含まない。粒子の衝突過程は、BGK モデルを用いて、粒子分布が单一時間内で局所平衡状態へと緩和すると仮定する。ここで、時刻 t 、位置 x において、速度 c_i に対応する粒子の分布関数の時間発展は以下の式で表される。

$$f_{ijk}(\vec{x} + \vec{c}_{ijk}\Delta t, t + \Delta t) = f_{ijk}(\vec{x}, t) + \Omega_{ijk}(\vec{x}, t), \quad (1)$$

$$\vec{c}_{ijk} \in \{-1, 0, 1\} \otimes \{-1, 0, 1\} \otimes \{-1, 0, 1\}. \quad (2)$$

Δt は時間刻み、 c_{ijk} は粒子速度、 Ω は衝突演算子である。本計算では離散的粒子速度として、高レイノルズ数の複雑物体を含む流れの解析に有効な 3 次元 27 速度 (D3Q27) モデルを採用した。また、衝突緩和モデルとして、都市部の流れのような高レイノルズ数の乱流解析での、解析精度や安定性の観点から Cumulant relaxation time model[3] を採用すると共に、小林により提案されたコーヒーレント構造スマゴリンスキーモデル [4] を適用した。また、都市街区内の植生分布に関しては、抵抗力に基づくモデルを採用した [5]。

(2) 温度の時間発展および地表面熱流束モデル

格子ボルツマン法による熱流動解析では、流体と熱の時間発展を LBM で解く手法や、熱の時間発展は差分法で解く手法など、様々な手法が提案されている。都市街区を対象とした風況解析では温度の陽的な時間発展が可能であるため、メモリの使用量が LBM よりも少ない差分法に基づき定式化し、移流項に対して 5 次精度 WENO 法を採用した。温位が LBM に与える影響はブジネスク近似を用いて外力項として評価した。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \theta = \left(\chi + \frac{\nu_{SGS}}{\text{Pr}_{SGS}} \right) \nabla^2 \theta. \quad (3)$$

ここで、 χ は流体の温度拡散係数、 ν_{SGS} は乱流モデルによる渦粘性係数、 Pr_{SGS} はプラントル数である。

地表面近傍の接地境界層において、温位が変化しない中立成層のときには風速分布は対数分布則に従う。一方で、温位が高さにより変化する安定成層や不安定成層のときの風速分布は、中立成層の場合とは異なる。その様な様々な大気の条件において、モニン・オブコフの相似則に基づくモデルにより、地表面近傍の風速・温位および地表面温位から地表面からの熱流束を反復計算により求めることが可能である。

$$L = -\frac{u_*^3 \theta_o}{\kappa g q_3|_w}, \quad x = (1 - 15z/L)^{1/4}, \quad (4)$$

$$\psi_m = \begin{cases} -4.7 \frac{z}{L} & L > 0 \\ 2 \ln(\frac{1+x}{2}) + \ln(\frac{1+x^2}{2}) - 2 \arctan(x) + \frac{\pi}{2} & L < 0, \end{cases} \quad (5)$$

$$\psi_h = \begin{cases} -7.8 \frac{z}{L} & L > 0 \\ 2 \ln[\frac{1}{2}(1 + x^2)] & L < 0, \end{cases} \quad (6)$$

$$u_* = \frac{\kappa \tilde{u}}{\ln(z/z_{om}) - \psi_m}, \quad (7)$$

$$q_z|_w = \frac{u_* \kappa (\theta_s - \theta)}{\ln(z/z_{oh}) - \psi_h}. \quad (8)$$

ここで、 L は局所のオブコフ長さ (m)、 u_* は摩擦速度 ($m s^{-1}$)、 θ_s および θ は地表面温位および地表面近傍の温位 (K)、 $q_z|_w$ は地表面からの温位に対する熱流束 ($K m s^{-1}$)、 $\kappa = 0.4$ はフォン=カルマン定数、 $z_{om,oh}$ は運動量および温位に対する粗度長 (m) となる。本研究では粗度長として、地表面を観測した論文 [6] に記載されている grassland (5cm) の値 $z_{om} = 0.00436$ および $z_{oh} = 0.00041$ を採用した。

(3) アンサンブルカルマンフィルタに基づく地表面温位バイアスの最適化

EnKF[7] は逐次型のデータ同化手法の一つであり、観測データ y^o を基に各アンサンブルの状態ベクトル $x^{(k)}$ のフィルタ分布を求める手法である。本研究では地表面温位バイアスを状態ベクトルに、観測データには地表面近傍の温位を割り当てることで、都市街区内の風況の再現を目指す。EnKF による状態ベクトルの時間発展として、システムモデルに基づく一期先予測と観測に基づくフィルタの 2 つを繰り返す。一期先予測は、状

態ベクトルの支配方程式（例えば、格子ボルツマン方程式やナビエストークス方程式等）に基づいて計算するが、地表面温位バイアスには一般的な支配方程式が存在しないため、以下のモデル式を用いて時間発展した。

$$x_{t|t-1}^{(k)} = x_{t-1|t-1}^{(k)} + v_t, \quad v_t \sim \mathcal{N}(\mu_x, \sigma_x^2). \quad (9)$$

ここで、下添字 t は一期先予測およびフィルタの時間ステップ、上添字 (k) はアンサンブル番号、 v_t は平均値 μ_x と標準偏差 σ_x から与えられる正規分布に従うシステムノイズとなる。

フィルタは、観測データ y^o 、および、状態ベクトルに観測演算子を作用させた観測値相当 ($y_{t|t-1}^{(k)} = \mathcal{H}(x_{t|t-1}^{(k)})$) を基に実施する。以下にフィルタで使用するアンサンブル平均ベクトル、アンサンブル偏差、観測値と観測空間における予報値の差（イノベーションベクトル）を示す。

$$\bar{x}_{t|t-1} = \frac{1}{N_e} \sum_{k=1}^{N_e} x_{t|t-1}^{(k)}, \quad (10)$$

$$\delta X_{t|t-1} = (x_{t|t-1}^{(1)} - \bar{x}_{t|t-1}, \dots, x_{t|t-1}^{(N_e)} - \bar{x}_{t|t-1}), \quad (11)$$

$$\bar{y}_{t|t-1} = \frac{1}{N_e} \sum_{k=1}^{N_e} y_{t|t-1}^{(k)}, \quad (12)$$

$$\delta Y_{t|t-1} = (y_{t|t-1}^{(1)} - \bar{y}_{t|t-1}, \dots, y_{t|t-1}^{(N_e)} - \bar{y}_{t|t-1}), \quad (13)$$

$$\delta y_{t|t-1}^o = y_t^o - \bar{y}_{t|t-1}. \quad (14)$$

ここで、 $\bar{x}_{t|t-1}$ は長さ N_x のベクトル、 $\bar{y}_{t|t-1}$ と $\delta y_{t|t-1}^o$ は長さ N_o のベクトル、 $\delta X_{t|t-1}$ は大きさ $N_x \times N_e$ の行列、 $\delta Y_{t|t-1}$ は大きさ $N_o \times N_e$ の行列、 N_x 、 N_o 、 N_e は、それぞれ状態ベクトル数、観測データ数、アンサンブル数を示す。

局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF)[8] によるデータ同化は、以下で与えられる。

$$VDV^T = (N_e - 1)I + (\delta Y_{t|t-1}^T R^{-1} \delta Y_{t|t-1}), \quad (15)$$

$$\bar{w} = (VD^{-1}V^T)(\delta Y_{t|t-1}^T R^{-1} \delta y_o), \quad (16)$$

$$\delta W = \sqrt{N_e - 1} (VD^{-1/2}V^T). \quad (17)$$

ここで、 D と V は固有値と固有ベクトル、 I は大きさ $N_e \times N_e$ の単位行列、 R は観測値の誤差共分散行列となる。最終的に、各アンサンブルメンバー k に対して、以下の状態ベクトルのフィルタを計算する。

$$x_{t|t}^{(k)} = \bar{x}_{t|t-1} + \delta X_{t|t-1} (\bar{w} + \delta W^{(k)}). \quad (18)$$

3. 東京都心部の風況解析

東京都心部に対する OSSE として、地表面温位のバイアス値を $+10K$ と設定した Nature run に対して、地表面近傍の温位（高さ 2m、11箇所）の 1 分間累積移動平均を観測値としたアンサンブル計算を実施した。計算条件として、 $6,144m \times 6,144m \times 1,536m$ の計算領域に対して、 $4m^3, 8m^3, 16m^3$ 解像度の格子を高さ 0 ~ 256m、256 ~ 512m、512 ~ 1280m に配置した。実際の都市街区を模擬するために、建物・地形の高さデータを読み込むとともに、衛星画像を基に地表面に植生分布（高さ

8m) を設定した。風況および温位の境界条件として、温位が一定の条件下にて、都市街区内の建物高さ・密度に基づいた対数則に基づく南西の流入風[9] (高さ 500m で風速 12m/s、カットオフ高さ 500m) を計算領域の外周および上端の 256m 以内の領域にナッジングデータ同化手法にて設定した。OSSE の地表面温位の初期値として、計算領域全体に対して、流入風の温位と同じ基準値 ($\pm 0[K]$) に対するバイアス値を設定した。EnKF のパラメータとして、地表面温位の時間発展式の標準偏差は $\sigma_x = 0.5[K]$ 、温位の観測誤差は $\sigma_y = 1[K]$ と設定し、1 分ごとにデータ同化による状態ベクトルを更新した。

Nature run の都市街区内の風況シミュレーション結果を図 1 に示す。地表面近傍の風の流れが複雑な構造物により乱されていること、および、風下側(可視化結果の奥行き側)に進むに従って地表面により加熱された温位が上空へと発達していくことが確認できる。

OSSE のアンサンブル計算により求められた観測ベクトル(地表面近傍温位)および状態ベクトル(地表面温位バイアス)を図 2、3 に示す。青の実線がアンサンブル平均値、青の点線が各アンサンブル値、および、灰色の実線が nature run の値(真値)となる。Nature run の結果から、約 60 分で地表面近傍の温位が定常となることが確認できる。OSSE では、計算開始時では温位変化が小さいものの、約 10 分経過後から急激に観測値に追従していることが確認できる。最終的には、アンサンブル数が (a) $N_{ens} = 4$ および (b) $N_{ens} = 8$ の条件において、観測値に対して $0 \sim 0.1[K]$ へと収束した。

地表面温位バイアスにおいても同様に、計算開始時においては観測値との差も小さいためランダムウォーク的な振る舞いをしているが、その後、地表面温位バイアスを上昇させることで、Nature run で設定した $10[K]$ と同程度の $10 \sim 15[K]$ を推定した。以上の結果より、EnKF を適用することで、観測データから境界条件のハイパーパラメータである地表面温位バイアス値を推定することが可能であることが示された。

4. まとめ

CFD 解析だけではモデル化できない都市街区内の複雑な風況を再現するために、EnKFに基づく境界条件のハイパーパラメータ最適化を実施した。地表面近傍の温位を観測することで、地表面温位のバイアス値を推定する OSSE を実施した結果、アンサンブル数が 4 および 8 の条件において、妥当なハイパーパラメータ推定が可能であることが示された。今後は、実際の観測データを基に、熱流束の計算に大きく関わる地表面粗度長等の最適化も行なっていく予定である。

謝辞: 本研究の一部は JSPS 科研費(課題番号 22H03599、21K17755)、学際大規模情報基盤共同利用・

共同研究拠点(課題番号 jh220030)の支援を受けた。計算には東京大学「Wisteria/BDEC-01」および日本原子力研究開発機構「HPE SGI8600」を使用した。記して謝意を示す。

参考文献

- [1] N. Onodera, Y. Idomura, Y. Ali, and T. Shimokawabe. Communication reduced multi-time-step algorithm for real-time wind simulation on gpu-based supercomputers, 2018/02/ 2018.
- [2] Naoyuki Onodera, Yasuhiro Idomura, Yuta Hasegawa, Hiromasa Nakayama, Takashi Shimokawabe, and Takayuki Aoki. Real-time tracer dispersion simulations in oklahoma city using the locally mesh-refined lattice boltzmann method. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 179, No. 2, pp. 187–208, 2021.
- [3] Martin Geier, Martin Schönherr, Andrea Pasquali, and Manfred Krafczyk. The cumulant lattice boltzmann equation in three dimensions: Theory and validation. *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 70, No. 4, pp. 507–547, 2015.
- [4] H. Kobayashi, F. Ham, and X. Wu. Application of a local sgs model based on coherent structures to complex geometries. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, No. 3, pp. 640–653, 2008.
- [5] Tsutomu Watanabe. Large-eddy simulation of coherent turbulence structures associated with scalar ramps over plant canopies. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 112, No. 2, pp. 307–341, 2004.
- [6] Y. M. Ma, M. Menenti, R. Feddes, and J. M. Wang. Analysis of the land surface heterogeneity and its impact on atmospheric variables and the aerodynamic and thermodynamic roughness lengths. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, Vol. 113, No. D8, 2008.
- [7] Geir Evensen. The ensemble kalman filter: theoretical formulation and practical implementation. *Ocean Dynamics*, Vol. 53, No. 4, pp. 343–367, 2003.
- [8] B. R. Hunt, E. J. Kostelich, and I. Szunyogh. Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform kalman filter. *Physica D-Nonlinear Phenomena*, Vol. 230, No. 1-2, pp. 112–126, 2007.
- [9] Manabu Kanda, Atsushi Inagaki, Takashi Miyamoto, Micha Gryschka, and Siegfried Raasch. A new aerodynamic parametrization for real urban surfaces. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 148, No. 2, pp. 357–377, 2013.

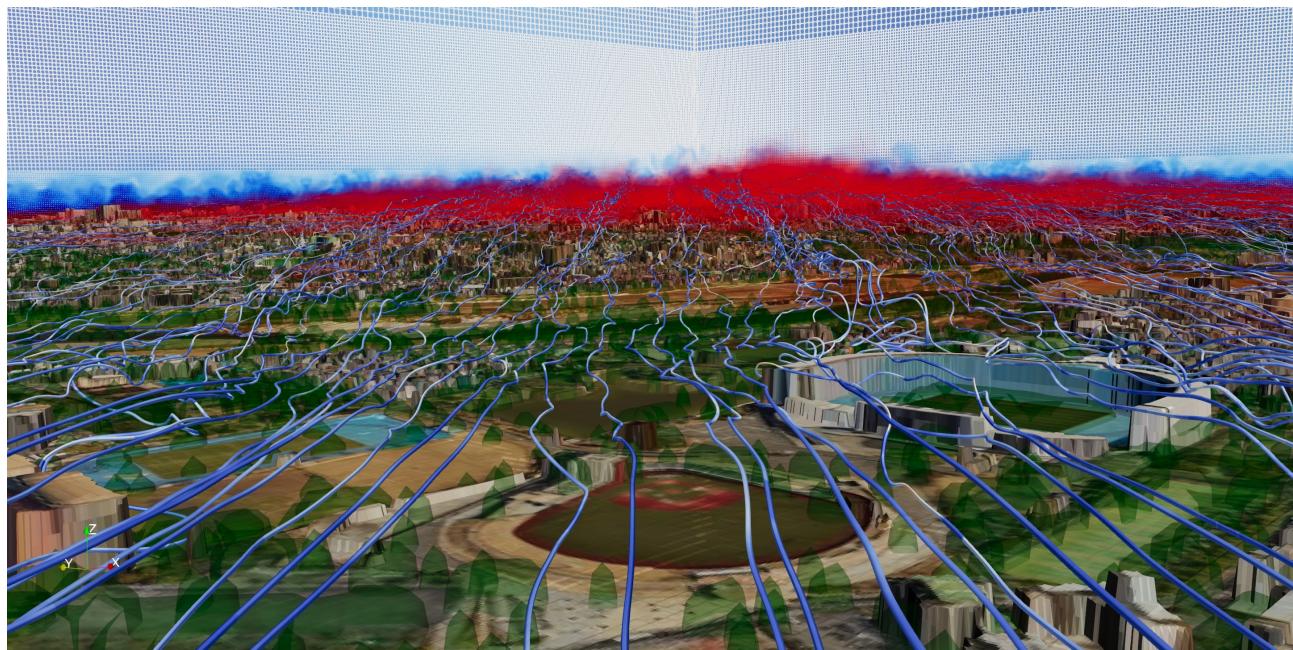
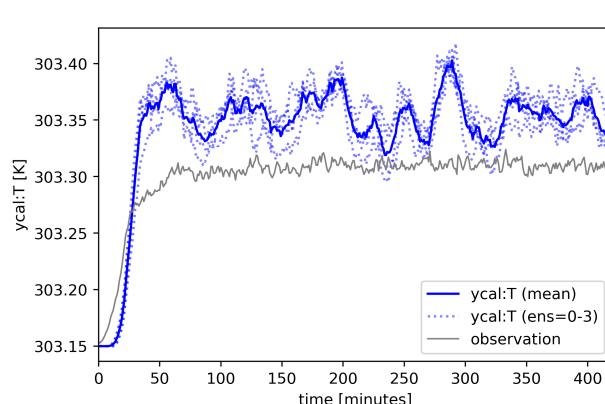
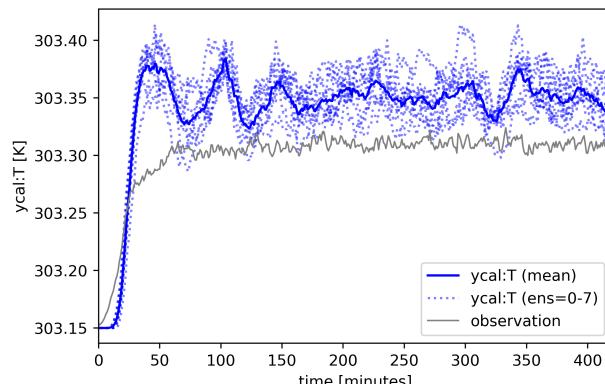


図-1 Nature run による都市街区内の風況シミュレーション。地表面近傍の流線、計算領域内の格子断面内の速度、および、地表面により加熱された温度を可視化。

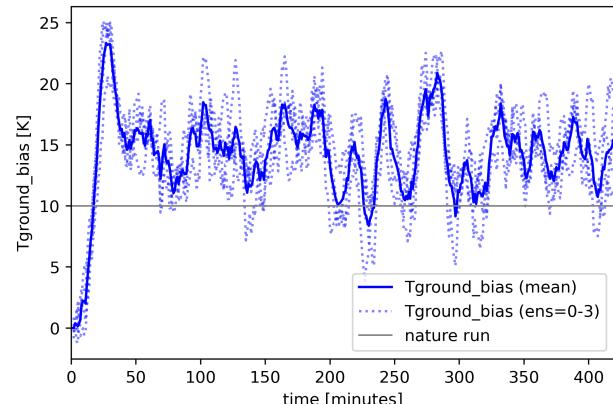


(a) $N_{ens} = 4$

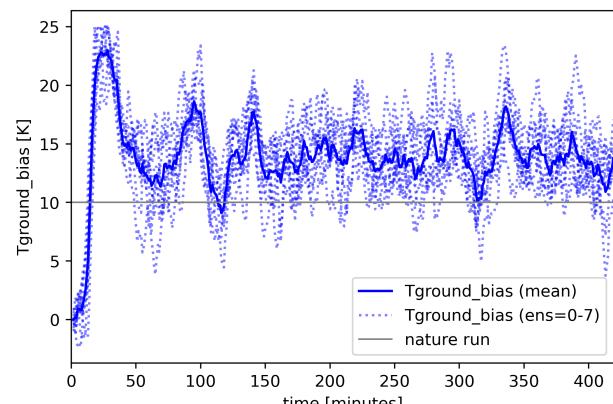


(b) $N_{ens} = 8$

図-2 地表面近傍の温位（観測ベクトル： Y 、 y_o ）の時刻曆。



(a) $N_{ens} = 4$



(b) $N_{ens} = 8$

図-3 地表面温位バイアス（状態ベクトル： X ）の時刻曆。