

jh220030

## 超高解像度の即時予測の実現に向けた都市街区内風況データベースの構築

小野寺直幸（日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター）

GPU スーパーコンピュータ上において、メートル解像度の風況シミュレーションに観測データをリアルタイムに同化した、都市街区内の風況予測の実現を目指している。初年度である 2022 年度は、高精度に大気境界層内の風況を再現するために、風況解析コード CityLBM に対してパーティクルフィルタ (PF) に基づくデータ同化手法を適用することで、モデル変数の動的な最適化手法を開発した。米国オクラホマシティの野外風況観測実験に対する解析を行った結果、PF を適用しない結果と比較して、終日の速度の標準偏差の誤差に対して約 10%の改善が実現された。東京都市街区内の風況解析として、地理情報システム (GIS) および衛生画像から構築した建物・地形・植生分布、および、防災科研の雲解像数値モデル (CReSS) から与えられる境界条件に基づくマルチスケール解析を実現した。

### 1. 共同研究に関する情報

#### (1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

- ・東京大学 情報基盤センター
- ・mdx

#### (2) 課題分野

- ・データ科学・データ利活用課題分野

#### (3) 共同研究分野

- ・超大規模数値計算系応用分野
- ・超大規模データ処理系応用分野

#### (4) 参加研究者の役割分担

- ・ 代表者（日本原子力研究開発機構）：  
小野寺 直幸：課題の主導、風況解析・観測
- ・ 副代表者（東京大学）：  
下川辺 隆史：大型計算機における最適化の助言
- ・ 協力者（日本原子力研究開発機構）：  
井戸村 泰宏：風況システムの結果の評価  
河村 拓馬：計算結果の可視化  
朝比 祐一：深層学習モデルの実装  
長谷川 雄太：データ同化手法の実装  
伊奈 拓也：GPU/A64FX に対する最適化  
下村 和也：プリ・ポストプロセスの実行
- ・ 協力者（東京工業大学）：  
稲垣 厚至：東工大周辺の物理モデルの構築
- ・ 協力者（防災科学技術研究所）：

平野 洪賓：観測システムの構築

下瀬 健一：メソスケールモデルの実行

### 2. 研究の目的と意義

デジタルツインに基づく風況予測は、都市街区内の歩行者に対する熱中症評価や微小粒子状物質の拡散予測などスマートシティ設計・運用に応用できるだけでなく、小型無人機利用に向けた突風予測等の新たな社会基盤構築に貢献できる技術である。風況デジタルツインの実現には、都市全域を含む広域な気象場から建物や樹木等を捉えたマルチスケール乱流解析のための大規模計算技術に加えて、数値流体力学 (CFD) 解析だけではモデル化できない境界条件や乱流変動をシミュレーション内に反映するデータ同化技術が不可欠である。

申請者は、格子ボルツマン法 (LBM) に対して、流れのスケールに応じて格子解像度を任意に変えることができる適合細分化格子 (AMR) 法を適用した風況解析手法 CityLBM を開発することで、高解像度のリアルタイムシミュレーションを実現すると共に、米国オクラホマシティにて実施された野外拡散実験に対して、メソスケール気象データを入力し、統計的な不確実性を評価するアンサンブル計算により、汚染物質濃度の実験との誤差が

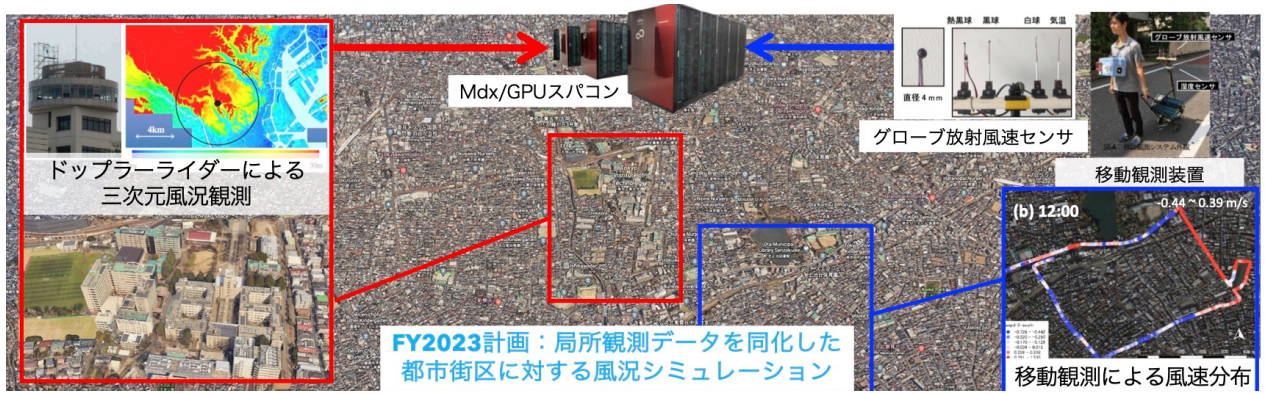


図1 東工大周辺の観測データを mdx/GPU スパコンに集約するシステムの概略図

ファクター2 以下という環境評価基準を満たす精度で汚染物質濃度の予測を実現した [Onodera et al., Boundary Layer Meteorol, 2021]。

次の課題は観測網からリアルタイムにデータを収集するシステムの構築である。これまで、過去に実施された観測データを前処理して、シミュレーションの境界条件や植生モデル等の最適化に利用してきたが、風況デジタルツインでは、それらをリアルタイムに実施することが必要となる。そこで、共同研究者の所属する東京工業大学（東工大）に設置された広域の3次元風況観測装置であるドップラーライダー（防災科研所有）を利用するとともに、新たに地上数地点に移動式の風速温度計を設置し、高速なネットワーク機器を用いた観測システムの構築を目指す（図1）。

本研究の意義として、高性能な演算器・ネットワークを持つ JHPCN および mdx をデータ同化のプラットフォームとして活用することで、観測機器から得られた膨大なデータを利用した高解像度の風況シミュレーション、並びに、深層学習モデルによる即時予測の実現を目指す点が挙げられる。

### 3. 当拠点の公募型研究として実施した意義

都市街区の詳細な風況解析の実現には、数 km 範囲の都市全域から数 m 幅の路地を捉えた大規模なマルチスケール風況解析が必須となる。CityLBM は AMR 法の適用による計算格子点数の約 1/10 への削減および GPU 向け最適化による CPU 比 10 倍以上の性能向上を達成しているが、路地を捉えた最小の検証条件（6km 四方 3m 解像

度）においても、1 ケースで 8 GPU (A100) 程度の計算資源が必要となる。観測データをスパコンへと収集するシステムとして、mdx 上にサーバーを構築することが効率的であると考えている。以上のように、本研究プロジェクトは、JHPCN および mdx が提供している高速な計算資源の利用し、かつ、計算科学を専門とする JAEA、都市風況観測を専門とする東工大・防災科研の学際的な実施体制を構築することにより、初めて実現できる。

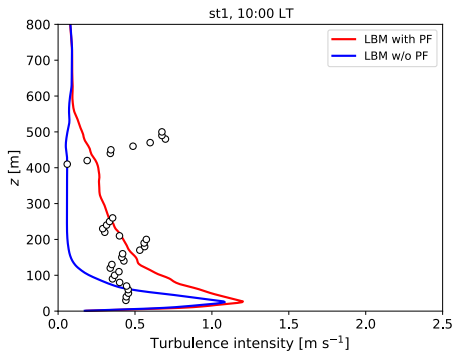
### 4. 前年度までに得られた研究成果の概要

該当なし。

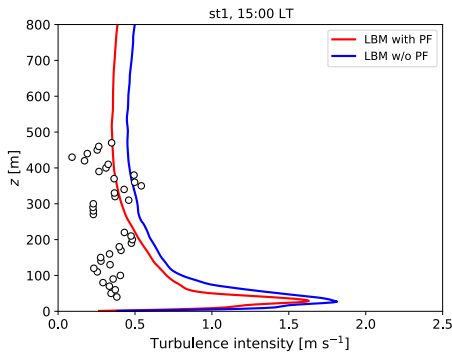
### 5. 今年度の研究成果の詳細

#### 5.1 パーティクルフィルタを用いた風況解析パラメータの最適化

局所風況解析手法 CityLBM に対する高度化として、広域および局所の風況データに対するデータ同化手法の開発・検証を行なった。現在、CityLBM では、メソスケールの風況を境界条件として利用する広域のデータ同化手法として、連続的に二つの物理量を近づけていくナッジングデータ同化手法を採用している。ナッジングデータ同化手法は、後述するアンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) に基づくデータ同化手法と比較して計算負荷が少ない利点がある。しかしながら、定数値の経験的なパラメータを含むため、大気状態が変化する現実的な気象条件下では精度が悪化する問題がしばしば起こっていた。



(a) 10:00LT



(b) 15:00LT

図2 速度の標準偏差の鉛直分布。赤線：PF あり、青線：PF なし、黒丸：観測結果

そこで本研究では、パーティクルフィルタ (PF) を用いた動的なパラメータ最適化手法を開発した。PF は逐次型のデータ同化手法の一つであり、観測データを基に各アンサンブルの状態ベクトルのフィルタ分布を求める手法である。本研究ではナッジングデータ同化の係数 (ナッジング係数) を状態ベクトルに、観測データには速度の標準偏差を割り当てることで、大気境界層の再現を目指す。PF 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、ナッジング係数では一般的な支配方程式が存在しないため、ランダムウォークに基づくモデル式を用いて時間発展した。

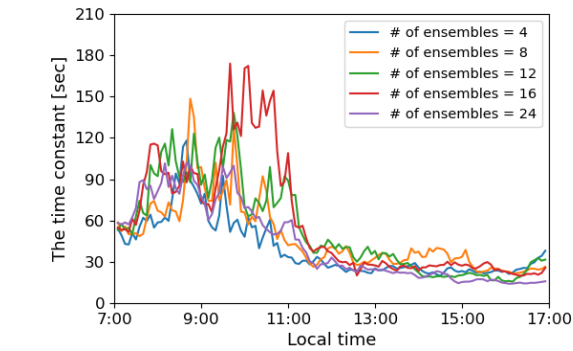
PF の検証として、オクラホマシティでの野外観測実験[Leach LLNL 2005]に対する解析を実施した。オクラホマシティの建物を模擬するために、

市街地中心部の約 1km 四方の領域に対して建物の高さデータを読み込むと共に、建物データを設定していない外側の領域に対して乱流を促進させるためのブロックを配置した。風況および温位の境界条件として、実験当日の WRF データを水平解像度 500m、鉛直解像度 50m、時間解像度 1 分間隔にて、計算領域の外周部に対して設定した。ナッジング係数は、正午の時刻にて最適化したナッジング係数 (60 秒で同化) を初期値と設定すると共に、5 分毎に速度の標準偏差に基づいた最適化を実施した。PF 無しの計算では、正午の時刻での最適化した係数を用いた。

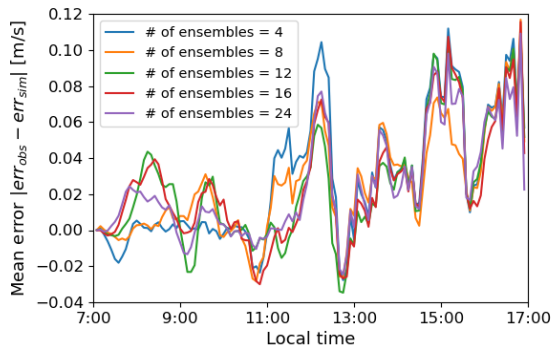
図2に、観測地点 (St.1) での速度の標準偏差の鉛直分布を示す。赤線が PF 有りの 15 分間のアンサンブル平均値、青線が PF 無しの 15 分間のアンサンブル平均値、黒丸が観測結果となる。PF 無しの結果では、高さ 100m 以上の速度偏差に対して、午前 10 時では過小評価し、午後 3 時では過大評価している。一方で、PF 有りでは、午前と午後共に、観測値を再現した値となっていることが確認できる。

図3に、データ同化時間 (ナッジング係数の逆数) の時間変化、および、PF 有無の観測値との誤差の差を示す。計算結果から、午前中の大気が不安定になり始める条件ではデータ同化時間を長くすることで計算内の乱流の発達を促進し、午後の大気が非常に不安定な条件においてはデータ同化時間を短くすることで、乱流が発達しすぎることが抑制していることが確認できる。また、誤差の差 (PF 無しの誤差 - PF 有りの誤差: 正の値で PF を適用したものが良い) については、午前中においては PF が良い、正午では PF を適用しないものが良い、午後では PF が良い (手動最適化が良い) となり、終日の誤差の平均値として PF の適用で約 10% の改善が実現された。以上の研究成果は 3 件の会議発表、1 件のライブラリの限定公開に結実した。

## 5.2 アンサンブルカルマンフィルタを用いた風況同化の高速化



(a)



(b)

図3 データ同化時間および PF 有無の誤差との差の各アンサンブル数における時刻暦。

現在、CityLBM では、データ同化手法として解析値と観測値の差に比例する付加項によって徐々に両者を近づけるナッジング法を導入している。本研究では、これをデータ同化が最も進んでいる分野の一つである気象分野で用いられている局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF) を用いた手法へと発展させた。LETKF の利点として、計算格子と比較して観測点密度が低い条件においても、比較的高波数を再現したデータ同化が可能であることが挙げられる。一方で、データ同化する格子点毎にアンサンブル数の大きさの密行列に対する固有値計算が必要であるため、リアルタイム計算の実現には固有値計算の GPU 高速化が必須であった。

この課題に対して、GPU 向けに理化学研究所の今村らと共同で開発したバッチ型固有値分解ライブラリ (EigenG-Batched) を利用するとともに通信を最適化することにより大幅な高速化を実現した。EigenG-Batched の利用により、GPU の標準

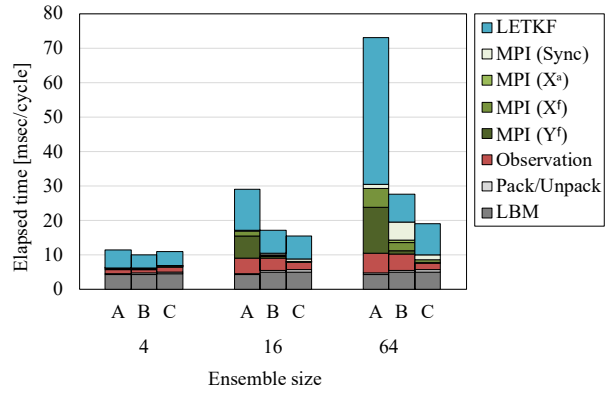


図4 二次元等方乱流の観測システムシミュレーション実験 (OSSE) のアンサンブル数  $M=4, 16, 64$  での計算時間。

の行列解法ライブラリである cuSOLVER による実装に比べ、16384 格子・64 アンサンブル計算の条件において LETKF の固有値分解を 65.3 倍高速化した。図4に外力項を加えた二次元等方乱流の観測システムシミュレーション実験 (OSSE) の計算時間を示す。計算時間の内訳として、行列サイズ  $M \times M$  の密行列の固有値分解等を含む LETKF、それに関わるアンサンブル計算間の通信、観測データの読み込み、および LBM の計算時間を示す。ここで、 $M$  はアンサンブル数を示す。記号 A—C は LETKF の実装方法の違いを表しており、A は LETKF の並列処理なし、B は LETKF を並列化し通信を MPI\_Allgather から MPI\_Alltoall に変更したものの、C は計算と通信及びファイル入力 (観測データの読み込み) のオーバーラップを適用したものの、となる。A—C のいずれも、固有値分解ライブラリとしては Eigen G-Batched を利用した。計算結果より、アンサンブル数が少ない  $M=4$  の条件においては、A—C の LETKF の計算時間が同様となっているが、 $M=64$  の条件においては、C の最適化により、3.8 倍程度の高速化が達成された。以上の研究成果は 1 件の国際会議論文、2 件の会議発表、1 件のライブラリの公開に結実した。

### 5.3 東京都市街区に対する風況解析

CityLBM による局所風況解析および CReSS による広域の気象解析を組み合わせたマルチスケール

の風況解析として、東京都心部に対する計算を実施した。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（一様に高さ 8m）を設定した（図 5）。計算格子として、6,144m × 6,144m × 1,536m の計算領域に対して、4m<sup>3</sup>、8m<sup>3</sup>、16m<sup>3</sup> 解像度の格子を高さ 0~256m、256~512m、512~1280m に配置した。風況および温位の境界条件は、2022 年 12 月 7 日のドップラーライダーの観測結果を基に CReSS を用いて作成した。

図 6 に東工大に設置してあるドップラーライダー観測に対応した視線方向の速度場（ライダーから離れる方向が正）を示す。計算結果および観測結果の比較より、風速・風向共におおむね一致していることが確認できる。一方で、観測結果を再現できない時刻等も複数ケースで見られるため、CityLBM の物理モデルの改良や、定点観測データを利用した EnKF に基づくパラメータ最適化および局所風況同化を進めていく必要がある。

## 6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

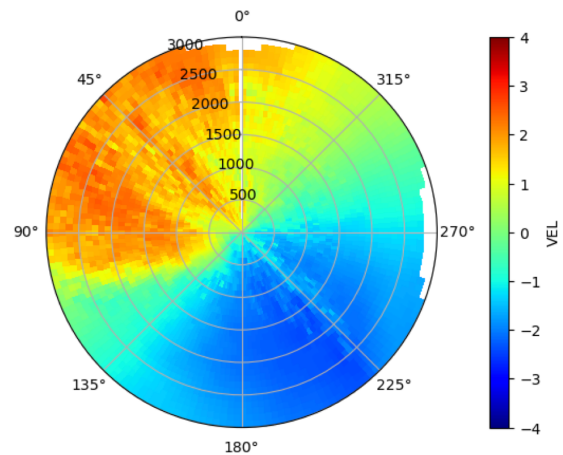
研究初年度である 2022 年度は、都市街区内のメートル解像度の風況の即時予測の実現に向けて、季節間・終日の大気状態の変化に対応するための PF に基づくモデルパラメータ最適化手法、観測点密度が低い条件においても、比較的高波数を再現したデータ同化が可能である LETKF の GPU 向き最適化、および、CityLBM と CReSS を組み合わせた東京都心部のマルチスケール風況解析を実現した。一方で、上記の解析において、四季を含む様々な気象条件に対する計算を予定していたが、東京都市街区モデルの構築およびパラメータの最適化に時間を費やしたため、わずか数ケースのみの解析に留まった。

観測システムの開発として、IoT 機器（ラズベリーパイ、Jetson AGX Orin）と観測装置を組み合わせることで、リアルタイムにデータを集約できる観測システムの開発を進めている。

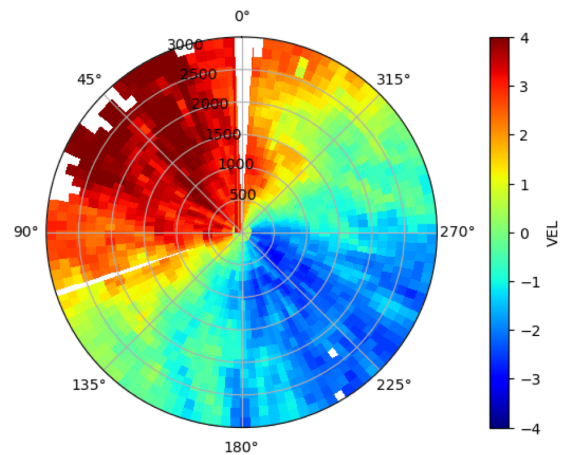
2023 年度の研究計画として、jh230014「都市街区の風況デジタルツインの実現に向けたデータ



図 5 都市街区風況シミュレーションの計算領域の可視化。



(a) CityLBM



(b) ドップラーライダー

図 6 東工大周りの風況データの比較（午後 3 時 30 分）。(a) CityLBM、(b) ドップラーライダー。

同化手法および観測システムの開発」にて、引き続き風況解析の高度化およびデータベースの構築を進めていくと共に、解析・観測データベースに

基づく即時風況予測モデルとして、深層学習モデル (AMRNet [Asahi et al., 2nd Workshop on AI4S (2021)]) の適用可能性について調査・検討する。

## 7. 研究業績

### (1)国際会議プロシーディングス

[1] Y. Hasegawa, T. Imamura, T. Ina, N. Onodera, Y. Asahi, Y. Idomura, "GPU Optimization of Lattice Boltzmann Method with Local Ensemble Transform Kalman Filter", 13th Workshop on ScalAH in SC22. (13th Nov, 2022, Dallas, TX, US)、査読あり

### (2)会議発表

[2] N. Onodera, Y. Idomura, Y. Hasegawa, H. Nakayama, T. Shimokawabe, T. Aoki, "Particle Filter for Large-Eddy Simulations of Turbulent Boundary-Layer Flow Generation Based on Observations", WCCM-APCOM 2022 (7/31-8/5, Yokohama)

[3] 長谷川 雄太、小野寺 直幸、朝比 祐一、井戸村 泰宏、"格子ボルツマン法と局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LBM-LETKF) による 3 次元乱流データ同化"、第 36 回数値流体力学シンポジウム (12/14-16)

[4] 小野寺直幸、井戸村泰宏、長谷川雄太、中山浩成、"アンサンブルカルマンフィルタを用いた乱流境界層生成のためのパラメータ最適化"、第 36 回数値流体力学シンポジウム (12/14-16)

[5] 小野寺 直幸、NVIDIA 冬の HPC Weeks - Week 1 「CityLBM による風況デジタルツインの研究成果「都市街区内の風況デジタルツインの実現に向けた高速化およびデータ同化技術の開発」、主催：エヌビディア合同会社、協力：東京工業大学 学術国際情報センター、名古屋大学 情報基盤センター、GPU コンピューティング研究会、(11/29)

[6] 長谷川 雄太、小野寺 直幸、朝比 祐一、井戸村 泰宏、"二次元格子ボルツマン法に対する局所アンサンブル変換カルマンフィルタの GPU 実装"、第 27 回計算工学講演会 (6/1-3)

[7] 小野寺 直幸、井戸村 泰宏、長谷川 雄太、下川

辺 隆史、青木 尊之、"適合細分化格子ボルツマン法による大気境界層生成のためのパラメータ最適化"、第 27 回計算工学講演会 (6/1-3)

(3)公開したライブラリなど

[8] CityLBM, 原子力機構より限定公開

[9] LBM2D-LETKF,

<https://github.com/hasegawa-yuta-jaea/LBM2D-LETKF>, 公開