jh200050-NAH

汚染物質拡散解析コードにおけるアンサンブル計算およびデータ同化手法

の高度化

長谷川 雄太 (日本原子力研究開発機構)

放射性物質の大気拡散予測シミュレーションは社会的関心が非常に高く、解析の迅速性 および正確性が求められている。本研究では、格子ボルツマン法に基づく都市風況・汚 染物質拡散の実時間解析コードの開発を進めてきた。今年度は、実証計算として検証し てきたオクラホマシティの野外拡散実験に対するアンサンブル計算について、トレーサ 濃度の詳細な精度検証を進め、FAC2条件(計算値が実験値の1/2倍~2倍に収まる条件) のほか、多くの統計的精度指標において本手法が極めて高い精度を達成していることを 示した。また、本手法におけるアンサンブルデータ同化の適用可能性を検討するため、 大アンサンブル数の計算を行い、統計諸量を評価した。その結果、本手法のような高解 像度風況解析では、風速の瞬時値を直接アンサンブルデータ同化に適用することは難し く、時間平均値を同化する手法を新たに開発する必要があることがわかった。

1. 共同研究に関する情報

共同研究を実施している拠点名

東京工業大学学術国際情報センター

共同研究分野

□ 超大規模数値計算応用分野

参加研究者の役割分担

・日本原子力研究開発機構

長谷川雄太 (代表):研究統括・計算コードの実装 小野寺直幸 (副代表):計算コードの実装、計算結 果の評価

井戸村泰宏:計算結果の評価

河村拓馬:計算結果の可視化

真弓明恵:データ処理手法の開発

・東京工業大学

青木尊之 (副代表):TSUBAME3.0 での高速化や AMR 法の助言

稲垣厚至:計算結果の評価

何暁卿 (中国籍・学生):熱モデルの高度化

・東京大学

下川辺隆史:大規模データ処理に関する助言

2. 研究の目的と意義

放射性物質の大気拡散予測の社会的関心は非常に

高く、解析の迅速性および正確性が求められる。 都市部の路地や建物等を解像する高精度拡散予測 の実現には 1m オーダの格子が必要であり、従来 の拡散予測シミュレーションや気象予報等のメソ スケールモデルで用いられる数百m格子に比べ大 幅な高解像度化が求められている。そのような高 解像度格子でリアルタイム解析を行うためには、 スパコンの計算機性能を最大限に引き出す解析手 法の開発が必須である。申請者らは、GPU スパコ ンに適した格子ボルツマン法 (LBM) による風況・ 汚染物質拡散解析コード『CityLBM』の開発を行っ てきた。

昨年度までに、GPU スパコンに適した格子ボル ツマン法(LBM)により、1m オーダの高解像度 格子を用いたリアルタイム風況解析を実現した。 基礎的なデータ同化手法であるナッジング法を用 いて、メソスケールモデルから計算された大域的 な気象場を境界条件として入力し、より現実に近 い条件で局所的な速度場を再現する計算を可能と した。さらにアンサンブル計算により、乱流の影 響による解析結果の不確かさを含めた風況および 汚染物質拡散の評価を行った。 これまでに実施したアンサンブル計算はメンバ ー間の同期を必要としない実装であった。今年度 は計算中に MPI_Allreduce 等の同期を取ること のできる並列版アンサンブル計算を実装し、さら にアンサンブルカルマンフィルタ等の導入による データ同化手法の高度化を目指す。

3. 当拠点公募型研究として実施した意義

本課題を達成するためには、建物形状や乱流の非 線形性をとらえた高解像度計算と、汚染物質の実 時間予測を可能とするための高速計算が必須とな る。昨年度までの課題において、東京工業大学の 青木教授および東京大学の下川辺准教授と共同で GPU 計算に適した適合格子細分化 (AMR) 法を開 発し、マルチスケールの風況解析を実現するとと もに、東京工業大学の学術国際情報センターと知 見を共有することで、TSUBAME3.0 における GPU DirectRDMA や NVLink を用いた通信性能向上を 実現した。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

4.1 リアルタイム都市風況解析のための格子ボル ツマン法 (LBM) および適合格子細分化 (AMR)法の GPU 実装

GPUで弱圧縮性単相流体を高速に計算できる計算 手法として格子ボルツマン法 (LBM)を導入した。 LBM は気体分子の運動論的方程式から導出され る手法で、格子点上を並進・衝突する仮想粒子 (速 度分布関数)の時間発展方程式を解く手法である。 空間は等間隔格子で離散化され、速度分布関数の 分子速度は1タイムステップでちょうど隣の格子 点に並進するような速度として定められる。衝突 過程においては、速度分布関数が局所平衡分布 (マ クスウェル分布)へと緩和する。衝突の緩和時間 は、流体の粘性により規定される。

都市気流は高レイノルズ数の流れであるため、 計算の安定性および精度が重要となる。安定性と 計算精度を得るため、本研究では、衝突項として、 速度分布関数の高次統計量を用いるキュムラント 衝突項モデル[参考文献 (1)]を採用し、さらに、LES 乱流モデルとしてコヒーレント構造スマゴリンス キーモデル (CSM) [参考文献 (2)]に基づく渦粘性

を導入している。

都市気流解析では、都市街区での数m解像度の 解析と、メソスケールモデルによる数百 m 解像度 の解析を繋いだマルチスケールの解析が必須とな る。AMR 法は格子解像度を任意に変化させること が可能な格子生成法であり、これを LBM に適用 することで、計算の高速化および計算資源の削減 が実現できる。AMR 法の実装としては、木構造 (Tree) 内の末端の葉 (Leaf) に n³ 個の直交格子 を割り当てるブロック型の AMR 法を採用した。 この手法は、メモリアクセスが不連続となりやす い AMR 法においても Leaf 内の格子間で連続的な メモリアクセスが可能となるため、GPU 計算に適 している。本研究では Leaf に 4³の格子点を割り当 てることで、GPU による高スレッド数の計算に対 応した。並列計算では、各プロセスの計算を担当 している Leaf の周囲に通信用の Leaf を配置する ことで、通信時の連続的なメモリアクセスを可能 とした[参考文献 (3)]。

GPU スパコンでは、 演算速度が CPU の 10 倍以 上に高速化される一方で、ノード間通信のバンド 帯は CPU スパコンと同程度であるため、通信時間 が大きなボトルネックとなる。AMR 法を適用した LBM では格子解像度毎に時間ステップ幅が異な るため、異なる解像度の領域の境界における時間 方向のデータ補間に伴うデータ依存関係を考慮し たマルチ時間ステップ法の適用が必須である。こ れにより、時間・空間補間を伴う複雑な通信処理 と同期処理が必要となるため、通常の並列計算と 比較して大きなオーバーヘッドが発生する。また、 ブロック型 AMR 法のデータ構造に対して、境界 データのみを通信する実装では、通信の前処理お よび後処理においてメモリアクセスの断片化によ る計算速度低下が発生するため、並列計算による マルチスケール解析の高速化は困難であった。こ の課題に対して、複数時間ステップ分の境界デー タをブロック単位でまとめて転送し、境界データ に対して冗長な時間発展計算を行うことで通信回 数を削減する通信削減型時間発展 (CRMT) 法を新 たに提案した。CRMT 法により、ブロック内の連 続的なメモリアクセスを維持した並列計算が可能 となり、更にはマルチ時間ステップ法での時間・ 空間補間に伴う余分な通信処理を削減することで、 効率的なマルチスケール解析の高速化が初めて実 現された。

以上の実装により、本研究では、1m 解像度 2km 四方の都市街区を対象とした局所風況解析のリア ルタイム計算を世界に先駆けて実現した[参考文 献 (4)]。

4.2 大規模計算に適した熱流動解析手法の開発 汚染物質の拡散解析では、大気境界層内の気温の 垂直分布が風況および拡散過程に大きな影響を与 えることが知られており、熱流動解析が必須であ る。従来のボルツマン方程式に基づく熱流動解析 手法では速度場と熱流動場の両者が LBM で定式 化され、温度方程式を差分法により離散化したも のと比較して、多くのメモリが必要である。そこ で、本研究ではメモリ使用量と計算コストの削減 を両立する計算手法として温度方程式と LBM の 速度場を組み合わせたハイブリッドモデルを採用 した。本手法により、3次元熱対流実験[参考文献 (5)]の検証計算において実験結果を定量的に再現 することに成功した。また、AMR 法の適用により 格子点数を等間隔格子の半分以下に削減した。こ れらの手法により、従来の Navier-Stokes 方程式の CPU 実装に基づく熱流動解析コード JUPITER に 比べて 6.7 倍高速な計算を達成した[参考文献 (6)]。 4.3 オクラホマシティの野外拡散実験に対する検 証および計算モデルの追加実装

一昨年度からオクラホマシティの野外拡散実験 [参考文献 (7)]に対する実証解析を継続して進め ている。本解析を実施するため、または精度を向 上するために幾つかの追加の実装を行なってきた。 その概要を以下に示す。

まず、汚染物質(またはトレーサ物質)拡散の 計算を追加した。汚染物質はパッシブスカラーで あると仮定し、移流拡散方程式を保存型の有限体 積法で離散化して解いている。次に、現実の気象 条件を計算に反映させるため、ナッジングデータ 同化[参考文献 (8)]を導入した。本データ同化では、



図 1: オクラホマシティの野外拡散実験におけ るトレーサ物質の放出点および観測点(A~H、 St.II)、公園緑地の範囲(Botanical garden)

気象データを基に WRF (Weather Research and Forecasting) で計算されたメソスケール気象場の 速度と温度を計算領域外縁の緩和領域に入力する ことで、LBM に現実の気象条件を反映させる。

一昨年度は、上記のモデルだけでは野外拡散実 験のトレーサ物質濃度を十分再現できなかったこ とが確認され、検証計算を進めていた。検証の結 果以下の2点の課題が発覚したため、これを解決 するためのモデル導入を行なった。1点目として、 局所風況解析では、メソスケールで考慮されてい なかった都市内の公園緑地内の樹木等が、地表面 近傍の風況に大きな影響を与え、汚染物質の上空 方向への拡散を抑制することがわかった。このた め、樹木等の影響を評価するため、植生モデル[参 考文献 (9)]を導入し、公園緑地内に適用した。ま た、2点目の課題として、2mの高解像度格子の計 算では、乱流の影響により汚染物質濃度が高い領 域が間欠的に移流し、観測値の時系列データが大 きくばらつくことがわかった。乱流の不確実性を 含めて評価を行うため、アンサンブル計算を導入 した。アンサンブル計算においては、計算条件の 摂動として、計算領域外周部に配置している乱流 促進用のブロックの位置を水平方向にずらす実装 を行った。

オクラホマシティの野外拡散実験の検証計算とし て、2m 解像度格子、4km 四方の計算領域を設定 し、9アンサンブル計算を行った。本野外拡散実験 におけるトレーサ物質の放出点および観測点の位 置、計算における植生モデルの適用範囲 (Botanical garden) は図 1 に示す通りである。また、トレー サ物質の放出条件は、一定の放出源から 30 分間放 出を続ける連続放出条件である。本計算では、植 生モデルおよびアンサンブル計算の導入によりト レーサ物質濃度の予測精度が大幅に向上し、予測 値が FAC2 (計算値が実験値の 1/2 倍~2 倍の範囲 に収まることを満たす観測点の割合)の指標に対 して十分な精度を達成できることが確認された。

なお、本計算結果については、今年度まで継続 して精度評価を行ってきた。このため、今年度の 成果に相当する部分を次の 5.1 節において説明す る。

5. 今年度の研究成果の詳細

5.1 オクラホマシティの野外拡散実験を対象とし たアンサンブル計算の精度の詳細評価

オクラホマシティの野外拡散実験について、昨年 度は FAC2 の指標のみを評価したが、今年度はよ り詳細な精度の評価として、以下の式で表される Fractional bias (FB)、Geometric mean bias (MG)、 Geometric variance (VG) を評価した。

$$FB = 2(\overline{X_o} - \overline{X_p})/(\overline{X_o} + \overline{X_p})$$
$$MG = \exp(\overline{\ln X_o} - \overline{\ln X_p})$$
$$VG = \exp\{\overline{(\ln X_o - \ln X_p)^2}\}$$

ここで、 X_o, X_p はそれぞれ実験値、計算値のデータ の集合であり、上線は集合の平均値を表す。実験 値と計算値が完全一致する場合(perfect model)、 FB=0、MG=1、VG=1 となる。実用上は |FB| < 0.3, |MG - 1| < 0.3 が望ましい("good" or "acceptable" model)とされている[参考文献 (10)]。 また、VG の閾値は言及されていないが、VG=1 (ln VG=0) に近い小さい値ほど良いとされている。 4.3 節と同様の計算条件において、トレーサ物質濃 度予測値の 30 分平均値および最大値に対して

FAC2、FAC5(計算値が実験値の 1/5 倍~5 倍とな

表 1: 2 m 解像度、4 km 四方、9 アンサンブ ル計算におけるトレーサ物質濃度の予測性能指標

	Mean	Max.	Threshold of "good" model
FAC2	0.76	0.76	> 0.5
FAC5	1	1	
FB	0.01	-0.13	± 0.3
MG	1.06	0.93	1 ± 0.3
ln VG	0.30	0.39	

る割合)、FB、MG、VG を評価した。なお、観測 点 A は、トレーサ放出点から見て風下の方向に はないことから、実験値がゼロとなるという特異 性を有する。点 A を含めて精度を評価すると、実 験値において VG が無限大に発散する問題があ ったため、点 A を除く点 B~H の観測値を用い て評価を行った。

精度評価の結果を表 1 に示す。表に示す通り、 トレーサ濃度の平均値、最大値とも FAC2、FAC5、 FB、MG の全ての指標において良好な値を示して いる。また、本計算では ln VG < 0.4 となっている が、これは先行事例と比較しても小さく、極めて 良好な値である。

以上の検証により、本手法が野外拡散実験に対 して極めて高い精度でトレーサ物質の拡散を再現 できることが示された。本成果は、このような高 精度の計算を実時間相当の高速計算で実現した世 界初の事例であり、学術論文[研究業績 1] および プレスリリース [研究業績 6] にて成果を公表し た。

5.2 大アンサンブル計算における統計諸量の評価 これまで開発してきたアンサンブル計算コードの データ同化の適用可能性を検討するため、アンサ ンブル計算の統計諸量の評価を行った。ここで明 らかにするべき事項は、(1) アンサンブル計算に おいて各物理量の確率分布は正規分布に従うか、

(2) アンサンブルデータ同化で利用する共分散
 (相関)は妥当な値を示すか、(3) アンサンブル
 計算およびアンサンブルデータ同化を行うにあた
 り必要最小限のアンサンブル数はいくつか、の3

点である。これらについて以下で説明する。また、 本節では、統計量をより詳細に評価するために大 アンサンブル数の計算が必要であったため、前節 とは異なる4m 解像度格子、4km 四方の条件で 100 アンサンブルの計算を行い、統計量評価用の データセットを用意した。

5.2.1 各物理量の確率分布

アンサンブルデータ同化の代表的な手法であるア ンサンブルカルマンフィルタは、確率分布を正規 分布であると仮定して定式化されている。このた め、データ同化を行う物理量の統計的なばらつき は正規分布に従う必要がある。

データ同化の適用性を確認するため、野外拡散 実験の1回目のトレーサ放出時間帯である 9:00-9:30 CDT において、観測点 D における風速および トレーサ濃度の瞬時値のヒストグラムを確認した。 結果を図 2 に示す。図 2 (a) より、風速のばらつ きは正規分布に比較的近い分布を示すことが確認 でき、したがって風速に対してのアンサンブルデ ータ同化は適用可能と考えられる。一方で、図2 (b) より、トレーサ濃度は正規分布を示さず、ゼロ 付近の値が高頻度に出現する分布になることがわ かった。この分布は正規分布よりも対数正規分布 やガンマ分布によく従うことから、トレーサ物質 の拡散過程は乗算的な確率過程でばらつくことが 明らかになった [研究業績 2]。これは、物理量の 統計的ばらつきを正規分布とするアンサンブルカ ルマンフィルタの仮定に反しており、したがって トレーサ濃度の観測値を従来のアンサンブルデー タ同化手法で直接同化することは困難である。こ の問題の解決には、正規分布を仮定しない新たな アンサンブルデータ同化手法(例えば、参考文献 (11))の導入が必要となる。

以上の結果から、5.2.2 以降では、まずはトレー サ濃度のデータ同化は考慮せず、風速のデータ同 化のみについて検討することとした。

5.2.2 相関係数の検証

アンサンブルデータ同化では、異なる格子点のデ ータ間の共分散をもとにデータ同化の修正量を決 定するため、異なる格子点上のデータに物理的な



図 2: 100 アンサンブル計算における各物理量 のヒストグラム

相関が存在する必要がある。アンサンブル計算で は、アンサンブル数が少ないときサンプリング誤 差に起因する非物理的な共分散(擬相関)が現れ ることが知られており、十分多いアンサンブル数 を設定する必要がある。そこで、都市風況解析に おける風速の共分散のアンサンブル数依存性を検 証した。トレーサ放出点(図1のRelease point) を基準として、他の観測点(図1のA~Hおよび St.II)との間の風速の共分散を評価した。ただし、 共分散を正規化して評価するため、共分散の代わ りに相関係数を算出して評価した。また、風速の 観測位置は地上から高さ50mの位置とした。

(1) 瞬時値または時間平均値の相関係数

都市風況では、建物まわりの風速シアーに駆動さ れる小スケールの乱流が支配的となるため、2 地 点の瞬時値には相関が現れず、時間方向の統計量 をとる必要があることが懸念される。そこで、風 速の瞬時値と時間平均値のそれぞれの相関係数を 比較した。瞬時値には 9:00 CDT の風速を用い、時 間平均値には 9:00-9:30 CDT の時間帯の風速を用 いた。アンサンブル数は 60 とした。

得られた相関係数エラー!参照元が見つかりま せん。を図 3 示す。それぞれの地点で瞬時値と時 間平均値を比較すると、瞬時値の相関係数が総じ て低い傾向にある。また、距離が近い点(B,C,D) ほど相関係数が高くなる傾向が見られる。これは 瞬時値には非線形性が強く、小さい時空間スケー ルで変動する乱流成分が多く含まれているのに対 し、時間平均値はより大きい時空間スケールで変 動する平均流成分を観測するためである。現実的 な観測網の時空間解像度でメソスケールモデルと 同様のデータ同化手法を適用するにはよりロバー ストな共相関が得られる後者を利用するのが適切 と考えられるため、本研究では、風速の瞬時値で はなく、時間平均値のデータ同化を考慮する。 (2) 相関係数の時間平均幅依存性

前項では風速の時間平均幅を 30 分間に固定し て評価したが、過渡的な風況の変化をアンサンブ ルデータ同化に反映するには時間平均幅は小さい ほど望ましい。そこで、相関係数の時間平均幅へ の依存性を評価した。上空 50 m の点を対象とし て、アンサンブル数は 60、時間平均幅は 0 分(瞬 時値) ~30 分の間で変化させた。

図 4 に、横軸を時間平均幅、縦軸を相関係数と してプロットした結果を示す。図より、瞬時値か ら 5 分間平均値では、相関係数が大きく変動して おり、また、値も比較的小さいことが確認できる。 15~20分間の時間幅では相関係数がほぼ平坦とな っており、適切に相関係数を評価できている。他 方、野外拡散実験 [参考文献(7)] における風速の 観測値もまた 15 分平均値であり、上記の時間幅と 一致する。したがって、本都市風況解析における 共分散の計算には、風速の 15 分平均値を用いるこ とが適切であるといえる。

(3) 相関係数のアンサンブル数依存性

前項ではアンサンブル数を 60 に固定して評価 したが、計算資源を考えると、アンサンブル数は



図 3:風速の瞬時値(橙色)または 30 分平均値(青色)に対する相関係数の分布



図 4: 風速の相関係数の時間平均幅依存性



図 5: 風速(15分平均値)の相関係数のアンサ ンブル数依存性

必要最小限であるべきである。そこで、都市風況 のデータ同化に必要なアンサンブル数を検討する ため、風速の相関係数のアンサンブル数依存性を 評価した。アンサンブル数は 1~60 の間で変化さ せた。時間平均幅は、9:00-9:15 CDT の 15 分間と した。

エラー!参照元が見つかりません。に、横軸を アンサンブル数、縦軸を相関係数としてプロット した結果を示す。図より、アンサンブル数 10 程度 以下では、相関係数が大きく変動していることが 確認できる。また、アンサンブル数 30 以上では概 ね相関係数が平坦となっていることから、アンサ ンブル数を 30 以上とすれば、適切に相関係数が評 価できると考えられる。すなわち、本都市風況解 析でアンサンブルデータ同化を行うには、30 以上 のアンサンブル数が必要であることが明らかとな った。

以上の検討をまとめると、都市風況解析におけ る風速のデータ同化として適用可能性が高いのは、 (1) 風速の15分間平均値を (2)30程度のアンサン ブル数を用いてデータ同化することであるといえ る。ただし、アンサンブルデータ同化は一般に、 瞬時値を同化するものとして定式化されているた め、時間平均値を同化できるデータ同化手法の開 発を新たに行う必要がある。これは今後の課題で ある。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

格子ボルツマン法に基づく実時間都市風況・汚染 物質拡散解析コードにおいて、アンサンブル計算 による統計的な精度評価を行うとともに、各物理 量の統計量からアンサンブルデータ同化の適用可 能性を検討した。進捗状況としては、まず、昨年 度から継続していたオクラホマシティの野外拡散 実験の精度検証の詳細な評価を完了し、成果を学 術論文 [研究業績1] およびプレスリリース [研究 業績6] にて公表した。また、当初計画していたア ンサンブル計算の MPI 化の実装が完了しており、 同実装を用いた 100 アンサンブルの計算により統 計諸量の評価を行った。この大アンサンブル計算 に関連した成果を [研究業績 2, 3, 4, 5] にて公表 した。

アンサンブルデータ同化の実装については、現 在も検討を継続している。これは、大アンサンブ ル数の計算における統計諸量の評価から、高解像 度の都市風況 LES 計算に従来のアンサンブルカル マンフィルタをそのまま適用することが困難であ ることが明らかとなったためである。現在明らか になっている課題は以下の2点である。

(1) 汚染物質濃度は、確率分布が正規分布に従わ ず、ゼロ付近の濃度が頻出するような分布を 示すため、正規分布を仮定する定式化に基づ いたアンサンブルデータ同化を直接適用する ことが難しい。

(2)風速の瞬時値では、2地点間の共分散が低く 見積もられる傾向があった。瞬時値には時間・ 空間的に小スケールの乱流成分が多く含まれ ているが、現実的な観測網で得られる空間・ 時間解像度でこれを捉えることは難しい。こ のため、より大きい時空間スケールで変動す る平均流成分を捉えることのできる時間平均 値に対するデータ同化を考慮する必要が生じ た。

これらの課題を解決するため、今後新しいデータ 同化手法の開発を行う必要がある。また、データ 同化手法の開発において、始めから数億格子の大 規模問題を対象として実装・最適化を行うことは 極めて難しいと予想される。このため、基礎的な 技術調査として、2 次元等方乱流の小さい系を用 いたデータ同化実験を並行して進めているところ である。

参考文献

- M. Geier, M. Schönherr, A. Pasquali, and M. Krafczyk, "The cumulant lattice Boltzmann equation in three dimensions: Theory and validation," *Comput. Math. with Appl.*, vol. 70, no. 4, pp. 507–547, 2015.
- (2) H. Kobayashi, "The subgrid-scale models based on coherent structures for rotating homogeneous turbulence and turbulent channel flow," *Phys. Fluids*, vol. 17, no. 045104, 2005.
- (3) N. Onodera and Y. Idomura, "Acceleration of Wind Simulation Using Locally Mesh-Refined Lattice Boltzmann Method on GPU-rich Supercomputers," in SCFA 2018: Supercomputing Frontiers 2018, pp. 128–145, 2018.
- (4) N. Onodera, Y. Idomura, Y. Ali, and T. Shimokawabe, "Communication Reduced Multitime-step Algorithm for Real-time Wind Simulation on GPU-based Supercomputers," 2018

IEEE/ACM 9th Work. Latest Adv. Scalable Algorithms Large-Scale Syst., pp. 9–16, 2018.

- (5) S. Uesawa, S. Yamashita, M. Shibata, and H. Yoshida, "Development of Numerical Simulation Method to Evaluate Heat Transfer Performance of Air Around Fuel Debris: Part 2 — Validation of JUPITER for Free Convection Heat Transfer," in Proceedings of 25th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE25), 2017.
- (6) N. ONODERA, Y. IDOMURA, S. UESAWA, S. YAMASHITA, and H. YOSHIDA, "Locally mesh-refined lattice Boltzmann method for fuel debris air cooling analysis on GPU supercomputer," *Mechanical Engineering Journal*, DOI: 10.1299/mej.19-00531, 2020.
- (7) M. J. Leach, "Final Report for the Joint Urban 2003 Atmospheric Dispersion Study in Oklahoma City : Lawrence Livermore National Laboratory participation," 2005.
- (8) C. Paniconi, M. Marrocu, M. Putti, and M. Verbunt, "Newtonian nudging for a Richards equationbased distributed hydrological model," *Adv. Water Resour.*, vol. 26, no. 2, pp. 161–178, 2003.
- (9) R. H. Shaw and A. R. Pereira, "Aerodynamic roughness of a plant canopy: A numerical experiment," *Agric. Meteorol.*, vol. 26, no. 1, pp. 51–65, 1982.
- (10) J.C. Chang, S.R. Hanna, "Air quality model performance evaluation," *Meteorol Atmos Phys*, vol. 87, pp. 167–196, 2004
- (11) E. D. Nino-Ruiz, H. Cheng, and R. Beltran, "A robust non-Gaussian data assimilation method for highly non-linear models," *Atmosphere (Basel).*, vol. 9, no. 4, pp. 1–20, 2018, doi: 10.3390/atmos9040126.

7. 研究業績一覧(発表予定も含む. 投稿中・投 稿予定は含まない)

- (1) 学術論文 (査読あり)
- [1] N. Onodera, Y. Idomura, Y. Hasegawa, H.

Nakayama, <u>T. Shimokawabe, T. Aoki</u>, "Real-time tracer dispersion simulation in Oklahoma City using locallymesh refined lattice Boltzmann method," *Boundary-Layer Meteorology*, 2021. doi: 10.1007/s10546-020-00594-x

(2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)

[2] Y. Hasegawa, N. Onodera, Y. Idomura, "Ensemble wind simulations using a mesh-refined lattice Boltzmann method on GPU-accelerated systems," *Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications* + *Monte Carlo 2020 (SNA* + *MC 2020)*, Mar. 2020.

(3) 国際会議発表 (査読なし)

[3] Y. Hasegawa, N. Onodera, Y. Idomura, "Ensemble simulation for micro-meteorological wind condition using locally-mesh refined lattice Boltzmann method," *The 3rd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems (COMPSAFE2020)*, Dec. 2020.

(4) 国内会議発表 (査読なし)

[4] 長谷川雄太、小野寺直幸、井戸村泰宏、"局所細分化格子ボルツマン法を用いたアンサンブル風況解析"、第25回計算工学講演会、2020年6月
[5] 長谷川雄太、小野寺直幸、井戸村泰宏、"局所細分化格子ボルツマン法による都市風況解析におけるアンサンブル計算の MPI 実装"、原子力学会2021年春の年会(オンライン)

(5) 公開したライブラリなど

該当なし

(6) その他(特許, プレスリリース, 著書等)

[6] プレス発表「リアルタイムで高精度な汚染物 質拡散シミュレーションを世界で初めて実現一都 市構造物の詳細を捉え予測精度を大幅に向上一」、 小野寺直幸、井戸村泰宏、長谷川雄太、中山浩成、 下川辺隆史、青木尊之、令和3年1月28日(日本 原子力研究開発機構)、

https://www.jaea.go.jp/02/press2020/p21012801/