

jh190049-NAH

アンサンブル計算に基づく汚染物質拡散予測の開発

小野寺 直幸（日本原子力研究開発機構）

放射性物質の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、風況の精度向上のための植生モデルの導入、および汚染物質の拡散予測精度の向上のためのアンサンブル計算の導入を行った。実証計算としてオクラホマシティでの野外拡散実験に対するアンサンブル計算を実施し、公園緑地に対して植生モデルを適用することで風況が改善すること、およびアンサンブル計算によって汚染物質拡散の不確かさを考慮することで計算の信頼性を向上させられることを確認した。この実証解析において汚染物質濃度が 70% の正答率で FACTOR 2（計算値が実験値の 1/2 倍～2 倍に収まる条件）を達成し、極めて精度の高い汚染物質拡散解析を実現することに成功した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東京工業大学学術国際情報センター

(2) 共同研究分野

□ 超大規模数値計算系応用分野

(3) 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：研究総括・計算コードの実装

・副代表者（東京工業大学）：

青木 尊之：TSUBAME3.0 での高速化の助言

・協力者（日本原子力研究開発機構）：

井戸村 泰宏：計算結果の評価

中山 浩成：拡散実験データの提供および計算結果の評価

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

長谷川 雄太：計算コードの高速化

・協力者（東京大学）：

下川辺 隆史：アンサンブル計算でのデータ処理に関する助言

2. 研究の目的と意義

2.1 研究目的

放射性物質の拡散予測シミュレーションは社会的関心が非常に高く、迅速性および正確性が求められている。日本における予測システムとして、緊

急時環境線量情報予測システム（SPEEDI）[参考文献 1] が用いられており、観測されたデータを基に放射性物質の広域拡散挙動をリアルタイムに計算することが可能になっている。しかしながら、人が生活する路地や建物等を含んだ高解像度の汚染物質拡散予測を実施するためには、計算機性能を最大限に引き出すことが可能な解析手法および高度な物理モデルの開発が必須となる。その様な課題に対して、昨年度の JHPCN 課題「格子ボルツマン法による都市街区を対象とした物質拡散シミュレーション」では、GPU スパコンに適した格子ボルツマン法（LBM）による解析手法（CityLBM）において、都市部の熱対流および植生等を考慮した風況解析手法、任意の境界条件の適用を可能とする基礎的なデータ同化手法を開発した。

CityLBM を信頼性の高い拡散予測システムとして運用するためにはメソスケールモデルや観測結果との連携が必須となる。そのような連携解析に対して、アンサンブル計算に基づくデータ同化手法は、異なる精度（解像度）を持つデータを融合するのに非常に有効な手法の一つである。今年度は、実際の観測データに対応したアンサンブル計算に基づくフレームワークを開発することで、汚染物質の拡散予測精度の向上および適用範囲の拡大を目指す。

2.2 研究目的

従来から用いられている SPEEDI 等の解析手法は、長年の経験の蓄積により、限られた計算資源の制約の下においても、地形や気象を考慮した拡散予測が可能である。一方で、複雑な構造物に起因する風環境や吹き溜まりを再現することができず、人が生活するスケールでのホットスポットの予測は難しい。

本課題で開発する CityLBM は、GPU に適した LBM を基に解析手法を構築することで、高解像度かつ高速な解析を行うことが可能であるとともに、メソスケールモデルにより得られた広域の風況解析結果を時間的に連続なデータ同化手法であるナッジング法を用いて同化している。さらに今年度においてアンサンブル計算を実装し、計算の不確かさ評価および観測値データに対応したデータ同化手法を導入することで、高度な風況予測が可能となる。本課題の達成により、原子力のみならず土木、建築、環境等、風況解析が関係する幅広い工学分野の発展に貢献できるだけでなく、GPU スパコンに適した高速化アルゴリズムの提案により、計算機科学分野に対しても有意義な結果を残すことが期待できる。

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 計算に適した適合細分化格子 (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 を用いた通信性能を向上させた。このように、TSUBAME3.0 を有効活用するためには、運用側と連携し、最新のハードウェアおよびソフトウェアに対する最適化の知見を継続的に導入していく必要がある。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

4.1 格子ボルツマン法による風況・物質拡散解析手法

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隣接する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。粒子の衝突過程により粒子分布が局所平衡状態へと緩和する。

都市気流解析では、高レイノルズ数の計算での安定性および精度が重要となる。本研究では粒子の衝突モデルとして、高次の物理量を用いた Cumulant LBM モデルを採用することで計算精度と安定性を確保した[参考文献 2]。さらに、LES 乱流モデルとして Coherent-structure Smagorinsky モデル[参考文献 3]に基づく渦粘性を導入している。

汚染物質拡散の計算手法としては、パッシブスカラーを仮定し、移流方程式を保存型の有限体積法で解いている。

4.2 適合細分化格子 (AMR 法) の導入

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 法の一つとして、木構造(Tree)内の末端の葉(Leaf)に N^3 等の格子を割り当てるブロック型の AMR 法がある。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 内にて N^3 の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 4^3 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 4]。

4.3 並列計算に適した通信削減時間発展法の開発

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幅は 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。

GPU スパコン ABCI を用いて、1m 解像度 2km 四方の都市街区の風況解析に対する強スケーリング性能測定を実施した。CRMT 法の適用により、225 台の GPU を用いた解析において従来手法の 2 倍の計算速度を達成すると共に、解析時間と実時間の比が 1 を満たす実時間風況解析に必要な GPU 数を 135 台から 60 台へと大幅に削減した[参考文献 5]。

4.4 大規模計算に適した熱流動モデルの開発

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、熱流動モデルの適用が必須である。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。

熱流動解析手法の検証のため、原子炉内のデブリから発生する熱流動現象の解明に向けた三次元自然対流実験[参考文献 7]に対する検証計算を行った。縦横高さ方向に $580 \times 580 \times 800 \text{ mm}^3$ の計算領域に対し、境界条件として、中心から半径 250 mm の底面に 420 K の熱源を配置、その他の底面は断熱境界条件、上面は 309.5 K、内部側面は実験等から得られた近似式を与えた。AMR 法を適用した CityLBM では、温度が急激に変化する壁面近傍に高い解像度の格子を配置した。時間平均した温度の鉛直分布を比較により、AMR 法の適用で格子数を半分以下に削減しつつ従来の熱流動解析手法である JUPITER の解析結果、および実験結果を再現した。計算速度の比較として、JAEA の汎用 CPU スパコン ICEX の 18 ノード (36 CPU) を用いた JUPITER に対して、ABCI の 1 ノード (4 GPU) を用いた CityLBM は 6.7 倍の計算速度を実現した (研究業績(1)-1)。

5. 今年度の研究成果の詳細

昨年度に実施したオクラホマシティの野外拡散実験[参考文献 8]に対する実証解析では、市街地内に設定された観測点での汚染物質の平均濃度を過大評価してしまい、環境評価で広く用いられている Factor2 (解析値が実験値の 1/2 倍～2 倍の範囲) に対して、十分な精度が得られなかった。この原因を調査した結果、先行研究等の局所風況解析では解析の複雑さや計算資源不足により考慮されていなかった植生が地表面近傍の風況に大きな影響を与え、地表面から上空への汚染物質拡散を抑制していることを確認した。また、高解像度計算では、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、観測地の時系列に大きな影響を与えるため、乱流の不確実性を考慮したアンサンブル

計算が必要であることが分かった。以下に、今年度実施した内容の詳細を示す。

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実施

昨年度から継続的に実施しているオクラホマシティ野外拡散実験に対して、植生モデルの適用およびアンサンブル計算の導入により計算精度向上を図った。計算条件として、 $4.2 \times 4.2 \times 2.5$ km の計算領域を設定し、地表面の最細格子を 2 m または 4 m 解像度とした 2 種類の条件で計算を行った。地表面の境界条件として、計算領域の中央約 1 km 四方には図 1 に示すようなオクラホマシティ市街地の建物データを読み込むとともに、他の外側の領域には乱流を促進させるためのブロックを配置した。これらの地表面および建物・ブロックにおける格子ボルツマン法の境界条件として、Interpolated bounce-back 法[参考文献 10]を適用した。風況および温度の境界条件として、気象データを基に WRF (Weather Research and Forecasting) モデルで事前に計算して作成された水平解像度 500 m、鉛直解像度 50 m、時間間隔 1 分のデータを時空間で線形補間して計算領域外周に入力した。このとき、計算領域の東西南北のそれぞれの端に幅 500 m の緩和領域を設け、ナッジングデータ同化[参考文献 11]を用いて、緩和領域内の物理量を以下の式により連続的に WRF の値に漸近させた。

$$T^* = T + w(\hat{T} - T)$$

$$f_{ijk}^* = f_{ijk} + w(\hat{f}_{ijk}^{eq} - f_{ijk})$$

ただし、 T, f_{ijk} はデータ同化前の温度および速度分布関数、 \hat{T} は WRF から与えられる温度、 \hat{f}_{ijk}^{eq} は WRF の速度場から与えられる平衡分布関数、 w はナッジングデータ同化の経験的定数である。この定数は乱流場に影響しない十分小さい値 $w = 10^{-3}$ と設定した。この設定は乱流場がない場合に 1 分間で計算値と WRF データを完全に一致させる条件となる。

図 1 の緑色で塗りつぶした領域は、ほとんど建物が存在しないが、衛星写真や地図等を確認したところ、更地ではなく公園緑地 (Botanical garden) であることが発覚した。そのため、同領域には植生

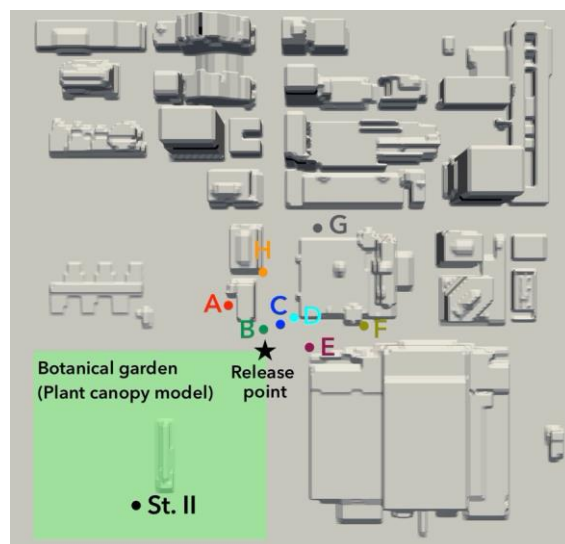
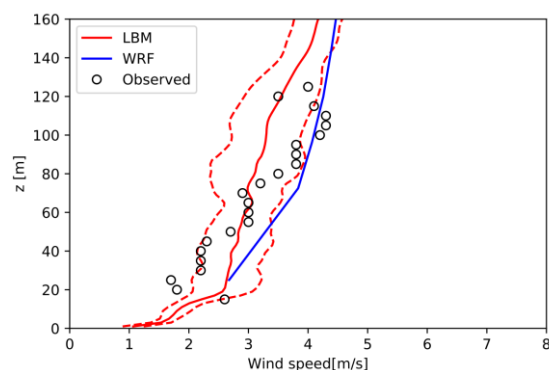
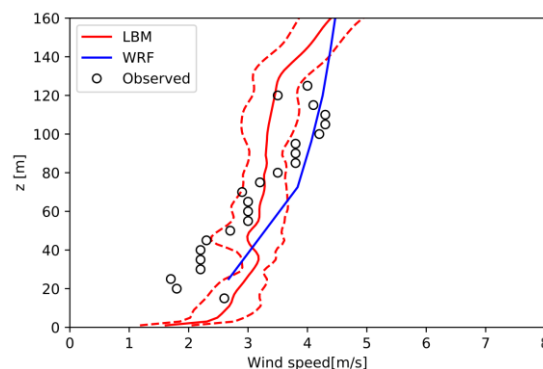


図 1 オクラホマシティ市街地の建物形状および植生モデル適用領域 (緑色の塗りつぶし)、トレーサ放出点、風況測定点 (St. II)、トレーサ濃度測定点 (A~G)



(a) 植生モデルあり



(b) 植生モデル無し

図 2 St. II における風速の鉛直分布

モデル[参考文献 9]を適用した。植生モデルでは、樹木の風況への影響を抗力としてモデル化し、樹木の存在する位置の速度場に対して下記の抗力を

加える。

$$F_d = -\rho C_d a_f |u|u.$$

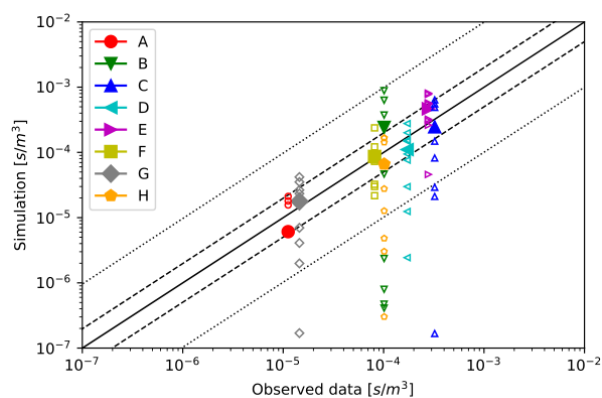
C_d は抗力係数、 a_f は樹木の投影断面積を反映したパラメータ (one-sided plant area density; PAD) である。本課題では、予備計算から風況がよく改善するパラメータを試行錯誤的に探索し、定数 $C_d a_f = 0.01$ を設定した。

アンサンブル計算においては、各ブロックの配置を水平方向±4 m の範囲でランダムにずらすことでアンサンブルの摂動とした。本計算では、9 アンサンブルメンバーでのアンサンブル計算を実施した。

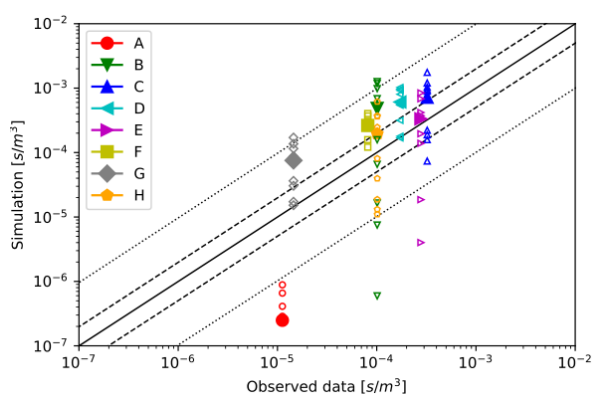
トレーサ物質は、現地時刻で 9:00~9:30CDT、11:00~11:30CDT、13:00~13:30CDT の 30 分×3 回、連続放出を行った。計算は 7:00CDT から開始し、物理時間で 1 分間隔で風況およびトレーサ物質濃度を測定した。ただし、トレーサ物質の放出位置、風況・トレーサ物質濃度の測定点は示すとおりである。以下に 2 m 解像度の結果を示すが、4 m 解像度でも同様の結果となることを確認した。

風況の測定結果として、St. II・9:00CDT における風速の鉛直分布をに示す。赤線は本計算結果であり、実線がアンサンブル平均値、破線はアンサンブル計算のばらつきの範囲(標準偏差を σ として、 $\pm 1\sigma$)を示す。青線は WRF の計算結果を観測点に線形補間した値、白抜きの点は実験値を示す。ここで、(a)は植生ありの計算結果、(b)は植生無しの計算結果である。 $z \geq 20$ m の上空部では、植生モデルあり/無しに依らず、計算結果は実験とよく一致していた。一方で、 $z < 20$ m の地表面付近では、植生モデル無しの場合には風速が過大に評価されていたのに対して、植生モデルを導入することで風速が実験値に近づいている。したがって、植生モデルを導入することで風況を大幅に改善できることが分かった。

トレーサ物質の測定結果として、測定点 A~H・9:00~9:30CDT におけるトレーサ濃度の時間平均値および最大値をそれぞれおよびに示す。横軸を実験値、縦軸を計算値とした散布図をプロットしている。白抜きの点は各アンサンブルメンバーの



(a) 植生モデルあり



(b) 植生モデル無し

図 3 各アンサンブルにおけるトレーサ濃度の時間平均値

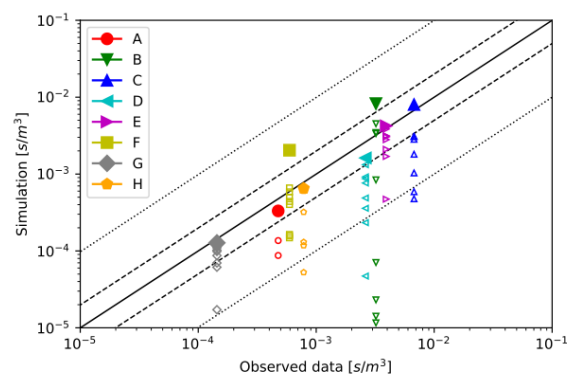
値、塗りつぶし点は全アンサンブルの平均値または最大値である。実線・破線・点線はそれぞれ実験値と計算値が完全一致・FACTOR2 (1/2 倍~2 倍)・FACTOR5 (1/5 倍~5 倍) となる範囲を示している。図より、平均値・最大値のいずれも、植生モデル無しでは濃度が過小評価される傾向があり、植生モデルを導入することでこれが改善されることが確認された。また、植生モデルありの結果について、各アンサンブルメンバーでは実験と計算値が一致しないものはいくつか見られるが、実験値は全てアンサンブルのばらつきの範囲であることが確認できる。各観測点・各アンサンブルメンバーで FACTOR2 を満たす計算結果を数え上げたところ、植生モデルありでは平均値で 71%・最大値で 71%、植生モデル無しでは平均値で 17%・最大値で 54%の正答率となった。以上より、植生モデルを導入することで風況だけでなくトレーサ物

質の濃度の測定結果も大幅に改善されること、およびアンサンブル計算によりトレーサ濃度をより精度よく評価できることが確認された。以上の研究結果を基に、研究業績(1)-2 の成果が得られた。

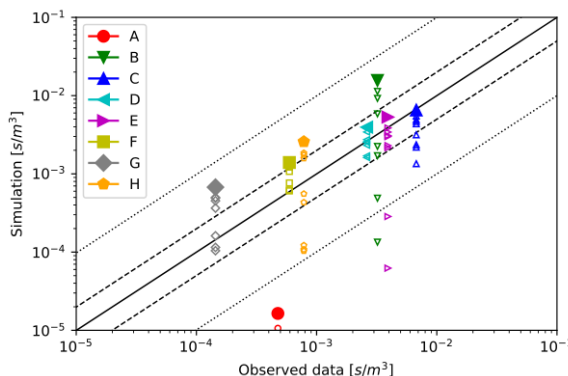
5.2 アンサンブル計算のMPI 化

本課題 5.1 節で実施したアンサンブル計算では、摂動のための初期条件を手動で設定し、1 アンサンブルメンバーにつき 1 ジョブの独立した計算を実行していた。このコードを発展させるため、摂動の生成を自動化する方法として、乱流促進用のブロックの配置を水平方向±4 m の範囲でランダムにずらす実装を自動化した。乱数の生成には mt19337 を使い、シードとしてアンサンブルメンバーの番号と各ブロックの水平位置 (x,y 座標値) から一意に定まる整数値を入力した。これにより、十分にまばらで、かつ再現性のある摂動を用いてアンサンブル計算を行うことが可能となった。また、MPI_Comm_split 関数により MPI コミュニケータを分割し、一度の mpirun で複数のアンサンブルメンバーを管理するコードを実装した。MPI_Allreduce を用いることで、計算中にアンサンブル平均値や標準偏差などの統計量を算出できるほか、観測点の値はポスト処理でもアンサンブル統計を取ることができるようにファイル出力するように実装した。

同コードを用いて、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を、100 アンサンブルメンバーで行った。計算条件は 5.1 節における 4 m 解像度格子と同様である。トレーサ濃度の平均値・最大値については 5.1 節と同様の結果が得られた。また、多数のアンサンブルメンバーで計算を行ったため、より詳細な統計の解析を進めた。9:00CDT~9:30CDT の 30 分間について、観測点 D にて 1 分間隔でトレーサ濃度を測定した時系列データを全アンサンブルメンバーでさらに集約したデータを作成し、そのヒストグラムおよび確率分布を求めた。結果を図 5 に示す。このトレーサ濃度の平均値は 138 ppm であるが、図 5 より、平均値に比べてゼロ付近の濃度の出現頻度が極めて高いことがわかる。このような分布は正規分布



(a) 植生モデルあり



(b) 植生モデルなし

図 4 各アンサンブルにおけるトレーサ濃度の最大値

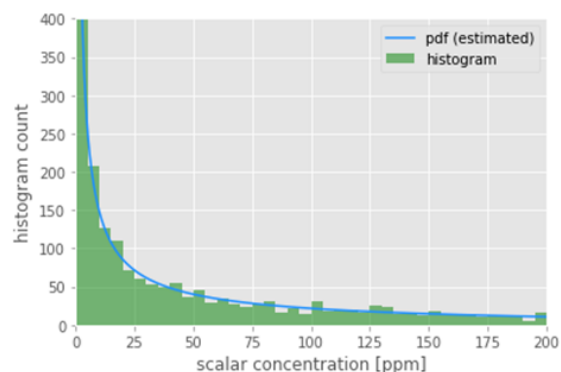


図 5 トレーサ濃度の出現頻度に関する確率分布

で表現することはできず、指数分布や対数正規分布などの分布で近似される。風洞実験[参考文献 11]においても同様に、トレーサ濃度の出現頻度が指数分布または対数正規分布で近似されることが見出されているが、単一の建物を対象とした実験であるため、多数の建物を含む実都市を対象とした本計算結果との直接の比較は困難である。したがって、この確率分布の解釈については、今後さらなる考察を進める必要がある。

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対して、公園緑地等への植生モデルの適用およびアンサンブル計算の導入を行った。進捗状況として、植生モデルの適用により、公園緑地周辺の風況が改善し、特に地表面付近 ($z < 20$ m) において計算値が実験値に近づくことを確認した。また、トレーサ濃度の測定結果について、1 ケースの計算では計算結果が実験値と一致しなかったものが、アンサンブル計算ではばらつきの範囲において実験値と一致することを確認した。都市街区における風況は、乱流等の影響を受けて本質的に排除不可能な不確実性を含んでおり、アンサンブル計算によって不確かさを評価することが重要であることを示した。また、アンサンブル計算の FACTOR2 (計算値と実験値の比が 0.5 倍~2 倍) に基づく正答率は 2 m 解像度格子において 70%であった。汚染物質拡散は、従来は FACTOR2 や FACTOR10 で評価されていたが、これを FACTOR2 で評価できるようになり、大幅な精度向上が達成された。

一方、アンサンブル計算に対するデータ同化手法の開発に関しては、アンサンブル計算の MPI 化、あるいは少数自由度モデル (ローレンツモデル) を用いたアンサンブルカルマンフィルタの基礎的検討といった準備段階に留まっており、CityLBM への実装は未達である。これは、実在都市を対象とした計算を行うにあたり、実験データのフォーマットを解読するのに時間を要したこと、都市中の樹木のデータが存在していなかったために衛生写真等を参考に手作業で樹木分布を作成する必要があったこと、アンサンブル計算を行うにあたり摂動の生成法を試行錯誤的に実装していたことなど、計算条件設定に想定以上の作業時間を要したことから研究計画が遅延したためである。

本課題は令和 2 年度に継続して実施される課題であるため、令和 2 年度においてアンサンブルデータ同化の実装を実施する予定である。また、100 アンサンブル計算を用いたトレーサ物質濃度の確率密度関数 (PDF) の評価を予備的に行ったため、

これについても継続して検討を進めたいと考えている。

7. 研究業績一覧 (発表予定も含む)

(1) 学術論文 (査読あり)

1. 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.

2. N. Onodera, Y. Idomura, Y. Hasegawa, H. Nakayama, Takashi Shimokawabe, Takayuki Aoki, “Real-time tracer dispersion simulation in Oklahoma City using locally-mesh refined lattice Boltzmann method,” *Boundary-Layer Meteorology* (submitted)

(2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)

(3) 国際会議発表 (査読なし)

1. N. Onodera, “GPU-accelerated real-time plume dispersion analysis based on Lattice Boltzmann Method”, *1st CEA-JAEA collaboration workshop on computational nuclear engineering*, Oct. 2019.

2. Y. Hasegawa, N. Onodera, Y. Idomura, “Enhancing Intra-node Multi-GPU Stencil Calculations on DGX-2 using Concurrent-addressing with Unified Memory,” *GPU Digital: GPU Technology Conference*, Mar. 2020 (Poster)

(4) 国内会議発表 (査読なし)

1. 小野寺直幸、井戸村泰宏、河村拓馬、中山浩成、下川辺隆史、 “局所細分化格子ボルツマン法を用いたオクラホマシティにおけるトレーサー拡散解析”、第 24 回計算工学講演会、2019 年 6 月
2. 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おける GPU 間相互接続技術を活用した高速化手法の検討”、日本機械学会第 32 回計算力学講演会、2019 年 9 月
3. 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部を対象

とした局所風況解析のアンサンブル計算に向けた省メモリ実装”、日本原子力学会 2020 年春の年会、2020 年 3 月

(5) その他（特許，プレスリリース，著書等）

1. “大規模シミュレーションと深層学習で、超高速の風予報を”、ABCI 利用事例集記事
2. “DGX-2 で実現する、リアルタイム風況解析への流れ”、HPC Wire Japan サイト記事、2019 年 7 月
3. “日本原子力研究開発機構、NVIDIA DGX-2 の活用で汚染物質拡散シミュレーションの高速化を実現”、NVIDIA 社ブログ記事（日刊工業新聞、および、オンラインメディア 31 社に掲載）、2019 年 5 月

参考文献

1. M. Chino, H. Ishikawa, and H. Yamazawa, “SPEEDI and WSPEEDI: Japanese Emergency Response Systems to Predict Radiological Impacts in Local and Workplace Areas due to a Nuclear Accident,” *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 50, no. 2–4, pp. 145–152, 1993.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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 *IEEE/ACM 9th Work. Latest Adv. Scalable Algorithms Large-Scale Syst.*, pp. 9–16, 2018.
6. CFD モデル環境アセスメント適用性研究会（編著），“CFD モデル（DiMCFD）による大気環境アセスメント手法ガイドライン”、Release 1.0、2013.
7. 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.
8. M. J. Leach, “Final Report for the Joint Urban 2003 Atmospheric Dispersion Study in Oklahoma City: Lawrence Livermore National Laboratory participation,” 2005.
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. M. Bouzidi, M. Firdaouss, and P. Lallemand, “Momentum transfer of a Boltzmann-lattice fluid with boundaries,” *Phys. Fluids*, vol. 13, no. 11, pp. 3452–3459, 2001.
11. C. Paniconi, M. Marrocu, M. Putti, and M. Verbunt, “Newtonian nudging for a Richards equation-based distributed hydrological model,” *Adv. Water Resour.*, vol. 26, no. 2, pp. 161–178, 2003.
12. 佐藤歩、佐田幸一、“単独建屋後流におけるトレーサガス濃度変動に関する風洞実験”、土木学会論文集、vol. 706、no. VII-23、pp. 41–49、2002