

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：82110

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K24359

研究課題名（和文）GPUスパコンを用いた都市風況解析の実時間アンサンブルデータ同化

研究課題名（英文）Real-time ensemble data assimilation for urban wind simulation using GPU supercomputers

研究代表者

長谷川 雄太（Hasegawa, Yuta）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・システム計算科学センター・研究職

研究者番号：10851016

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：格子ボルツマン法に基づく数m解像度の都市風況・汚染物質拡散解析に対し、アンサンブルデータ同化の実装に向けた研究開発を行った。まず、アンサンブル計算をMPI化し、100アンサンブル程度の大アンサンブル計算を系統的に行うことができるように実装した。次に、このコードを用いて、アンサンブル統計の評価を行ったところ、以下のことが明らかとなった。(1) 風速のヒストグラムは概ねガウス分布に従うが、汚染物質濃度のヒストグラムは正規分布を示さず、ゼロ付近の値が高頻度に出現する対数正規型の分布になった。(2) 風速の共分散を評価したところ、風速の瞬時値ではなく時間平均値を同化する必要があることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アンサンブルデータ同化は、気象庁の天気予報などで既に実用化された技術であるが、天気予報などの広域の計算で用いられる格子解像度は数100m～数kmである。一方で本研究では、都市部の局所風況を対象として、数mの解像度格子を用いている。このような高解像度格子では、従来見えなかった高周波・高波数の変動（乱流）が含まれるため、これまでのデータ同化手法を系統的に適用することができるかどうか自明ではなかった。本研究により、都市風況では、瞬時値は乱流の影響を強く受けるため、都市風況にデータ同化を適用するためには瞬時値の代わりに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明らかになった。

研究成果の概要（英文）：We proceeded the development towards the ensemble data assimilation for urban wind and pollutant dispersion with several meter resolution based on the lattice Boltzmann method. First, we implemented the ensemble calculation with MPI to systematically increase the size of ensembles into over 100. Using this code, we evaluated the ensemble statistics, and found the following: (1) The histogram of wind speed follows a Gaussian distribution, but the histogram of pollutant concentration does not show a Gaussian distribution, but a log-normal type distribution with values near zero appearing frequently. (2) Evaluation of the covariance of the wind speed showed that, the several meters-resolution urban wind simulation requires the data assimilation with the time-averaged values of wind speed rather than the instantaneous values.

研究分野：GPUコンピューティング

キーワード：格子ボルツマン法 都市風況 LES アンサンブル計算

1. 研究開始当初の背景

本研究では、建築物が密集する都市部における汚染物質拡散予測を実現するため、GPU で高速に計算できる格子ボルツマン法に基づく風況解析コード (CityLBM、図 1) に対し、アンサンブルデータ同化を実装することを計画している。

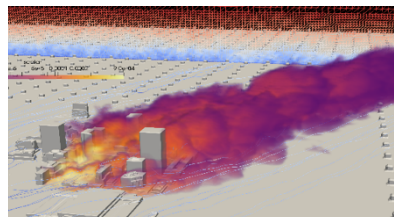


図 1 CityLBM コードによる都市部風況・汚染物質拡散解析

- (1) 先行研究において都市部 2 km 四方を対象とした 1 m 解像度の実時間物質拡散計算が達成されていたが、100 台規模の大規模 GPU 計算が必要だった。アンサンブル計算では、100 ケース程度の計算を並列に実行する必要があるため、合計で 10,000 GPU 程度の計算が必要で、国内最大の GPU スパコンでも実現不可能な規模となっていた。
- (2) アンサンブル計算については、先行研究でも手動で数回の計算を実行することで小アンサンブル計算を実行することは可能だった。しかし、手動で計算条件を設定する必要があることからアンサンブル数は 10 程度が上限であったこと、計算中にアンサンブル統計量をとることができないため現状のままではアンサンブルデータ同化の実装は不可能であったこと、といった問題があった。

2. 研究の目的

先行研究で開発された実時間都市風況解析コードに対して、アンサンブルデータ同化に向けた実装を進めること、および、都市風況に対するアンサンブルデータ同化の適用可能性を検討することを目的とする。

3. 研究の方法

- (1) 大アンサンブル計算を行うためには、1 アンサンブルあたりのメモリ使用量を削減する必要がある。先行研究のコードでは、既に適合細分化格子 (AMR) によってメモリ使用量が等間隔格子に比べて 10 分の 1 程度に削減されているが、これをさらに削減する手法を検討する。
- (2) アンサンブルデータ同化のためには計算中にアンサンブル統計量を算出する必要がある。そこで、従来は手動で数回に分けて実行されていたアンサンブル計算を MPI 化してまとめて実行できるようにするとともに、MPI_Allreduce() 等の関数を用いてアンサンブル統計量を算出するように実装する。
- (3) 都市風況に対す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、大アンサンブル計算を行ない、アンサンブル統計量から得られる分散・共分散を評価する。

4. 研究成果

(1) メモリ使用量削減の実装

メモリ削減実装として、建物内部の不要な格子を省く実装を行った。この実装により、オクラホマシティを対象とした実都市風況解析において最大 4% のメモリ使用量を削減できたが、削減の効果が十分ではなく、当初の目標としていたメモリ使用量 10% 以下を達成することはできなかった。一方で、風況や汚染物質拡散の計算結果を精査したところ、格子解像度を従来よりも粗い 4 m にしても同程度の結果が得られることがわかった。4 m 解像度格子は 4 GPU で計算可能であるから、100 アンサンブル計算 (400 GPU) が実現可能である。このため、大アンサンブル計算を行う際には格子解像度を 4 m とすることにした。

(2) アンサンブル計算の MPI 化

CityLBM コードでは、数億以上の格子点を扱うために MPI 並列が既に実装されているが、これに加えてアンサンブル計算を並列化した。図 2 のように、MPI_Comm_split 関数を用いた MPI コミュニケータ分割により、MPI プロセスに格子点分割の並列とアンサンブル並列に基づく 2 次元状の ID を与えるように実装した。従来は手動の計算条件設定を行う必要があるためにアンサンブル数が 10 程度に律速されていたが、本実装によりアンサンブル数を 100 以上まで系統的に増大させることが可能となった。

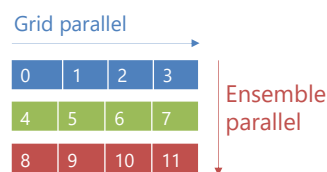


図 2 格子点分割・アンサンブル並列の概念図 (4 GPU 計算・3 アンサンブルの例)

(3) 大アンサンブル計算の統計諸量の評価

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。統計量をより詳細に評価するためには大アンサンブル数の計算が必要であったため、4 m 解像度格子・水平 4 km 四方・4 GPU 並列の条件で 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。

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、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 (図 3)。図 3 (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 3 (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ものであり、従ってトレーサ物質の拡散過程は乗算的な確率過程に基づく不確実性を有していることが明らかになった。これは、物理量の統計的な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の導入が必要となる。

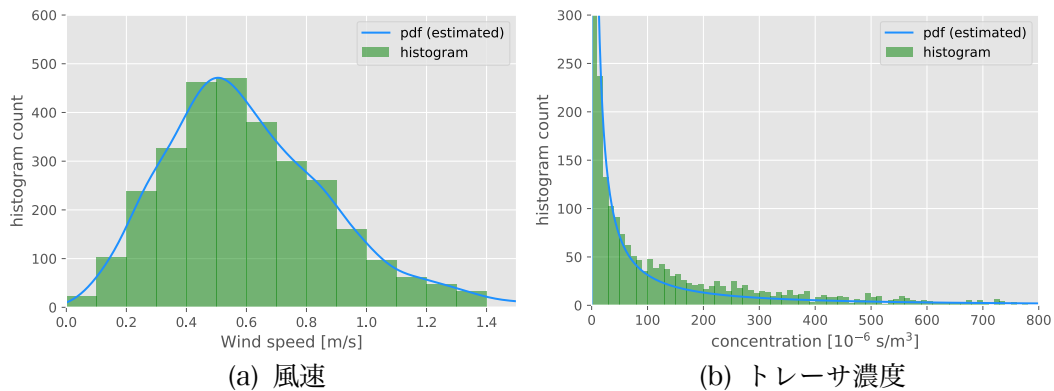


図 3: 100 アンサンブル計算における各物理量のヒストグラム

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。ただし、規格化された共分散として、相関係数を算出した。検証の結果、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、以下の条件であることが明らかになった。

① 風速の瞬時値ではなく時間平均値を同化する必要がある

図 4 に、瞬時値および時間平均値のそれぞれで算出した相関係数を示す。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。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。

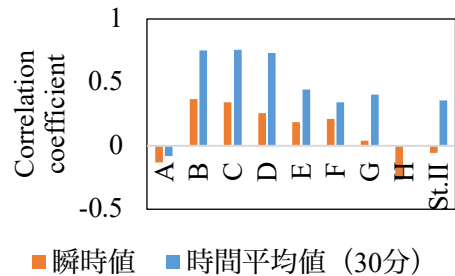


図 4 風速の瞬時値 (橙色) または 30 分平均値 (青色) に対する相関係数の分布

これは今後の課題である。

② 風速の時間平均値を算出する時間幅は 15 分が適している

前項 ① では風速の時間平均幅を 30 分間としたが、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。図 5 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。したがって、本解析の共分散の計算には、最低 15 分の時間平均値を用いることが適切である。

③ アンサンブル数は 30 以上が望ましい

前項 ①、② ではアンサンブル数を 60 で固定していたが、計算資源を考えるとアンサンブル数は必要最小限とするべきである。そこで、風速の共分散のアンサンブル数依存性を評価した。図 6 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。

これら ①～③ の知見を基に、今後、都市風況解析に対するアンサンブルデータ同化の開発を進める予定である。

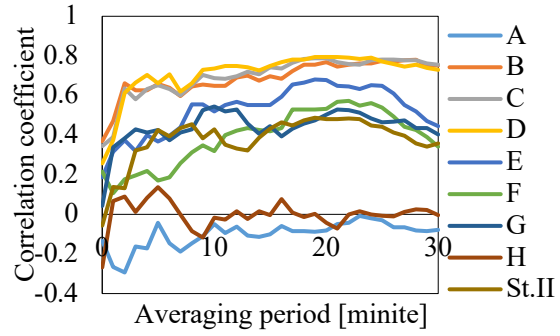


図 5 相関係数の時間平均幅依存性

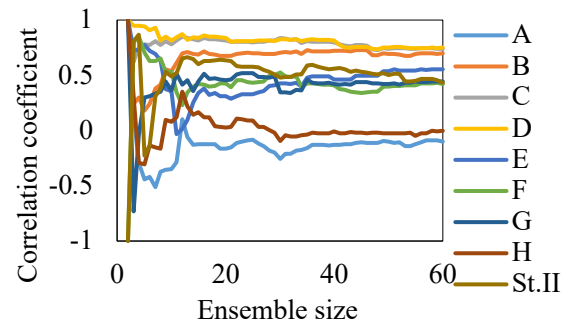


図 6 相関係数のアンサンブル数依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 長谷川雄太, 小野寺直幸, 井戸村泰宏
2. 発表標題 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
3. 学会等名 原子力学会2020年春の年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長谷川雄太, 小野寺直幸, 井戸村泰宏
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本計算工学会第25回計算工学講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長谷川雄太, 小野寺直幸, 井戸村泰宏
2. 発表標題 格子ボルツマン法のアンサンブル計算に基づく汚染物質拡散解析
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長谷川雄太, 小野寺直幸, 井戸村泰宏
2. 発表標題 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
3. 学会等名 原子力学会2021年春の年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuta HASEGAWA, Naoyuki ONODERA, Yaushiro IDOMURA
2. 発表標題 Enhancing Intra-node Multi-GPU Stencil Calculations on DGX-2 using Concurrent-Addressing with Unified Memory
3. 学会等名 GPU Technology Conference (GTC) Digital (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Hasegawa, N. Onodera, Y. Idomura
2. 発表標題 Ensemble wind simulations using a mesh-refined lattice Boltzmann method on GPU-accelerated systems
3. 学会等名 SNA+MC2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Hasegawa, N. Onodera, Y. Idomura
2. 発表標題 Ensemble simulation for micro-meteorological wind condition using locally-mesh refined lattice Boltzmann method
3. 学会等名 COMPSAFE2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------