

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K17755

研究課題名（和文）観測密度を上回る高解像度の都市風況LESに対するデータ同化手法の開発

研究課題名（英文）Development of data assimilation method for urban wind LES with higher resolution than that of measurement

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） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：格子ボルツマン法に基づくLESに対するデータ同化の適用可能性を検討するため、高精度なデータ同化手法として局所アンサンブル変換カルマンフィルタ（LETKF）を導入し、実装の高速化、および基礎的な精度検証を行った。LETKFの実装の高速化として、外部機関との共同研究によりGPU向け固有値ソルバライブラリの新規開発、およびMPI通信の最適化を行い、成果をオープンソースとして公開した。LESのデータ同化の精度検証として、2次元等方乱流および3次元角柱後方の乱流計算にてデータ同化実験を行った。いずれのケースでも、観測点数が計算格子より数桁少ない疎な観測条件で良好なデータ同化精度が確認できた。

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、都市部の局所風況を対象とした数mの解像度格子への適用は例がない。このような高解像度格子では計算速度が問題となることから、本研究では、気象分野でよく用いられる手法である局所アンサンブル変換カルマンフィルタ（LETKF）をGPUに実装し、および、GPUスパコンで高速に実行できる風況解析手法である格子ボルツマン法に適用した。これらの手法を組み合わせた研究は世界的にも例が無く、実装の高速化およびデータ同化の精度検証など基礎的な物理研究を行うことは、データ同化の乱流分野や風工学分野への展開に資するものとして意義がある。

研究成果の概要（英文）：To investigate the applicability of data assimilation to the LES based on the lattice Boltzmann method, we introduced a highly accurate data assimilation method, the local ensemble transform Kalman filter (LETKF). We proceeded the optimization and the validation of the implementation of the data assimilation.

As the optimization of the implementation of the LETKF, we developed a GPU-oriented eigenvalue solver library, and we optimized the MPI communication of the ensemble data.

To validate our implement, data assimilation experiments for 2D isotropic turbulence and turbulent flow around a 3D cylinder. In both cases, good accuracies were obtained with the sparse observation, where the number of observation points is several orders of magnitude smaller than the computational grid.

研究分野：計算科学

キーワード：アンサンブルデータ同化 格子ボルツマン法 局所アンサンブル変換カルマンフィルタ GPU

1. 研究開始当初の背景

テロによる有害物質の飛散や原子力施設での事故による放射性物質の漏洩など、非常時の汚染物質拡散を即時に予測することは、人命救護の観点において重要である。申請者の所属する日本原子力研究開発機構システム計算科学センターではこれまで、建物が密集する都市域における汚染物質拡散の即時予測を行うため、都市風況 LES コード「CityLBM」の開発が進められてきた。これまでに、局所細分化格子法を導入した格子ボルツマン法 (LBM) の GPU を用いた大規模計算により、1m 解像度格子による都市風況 LES の実時間解析が達成されている。さらにアンサンブル計算の導入により、野外拡散実験の実験値と比較して環境アセスメントで求められる精度を達成している [1]。本課題ではこれにアンサンブルデータ同化を導入することで、計算と観測の連携による汚染物質拡散の予測精度向上および高度化を目指している。

2. 研究の目的

アンサンブルデータ同化は主に気象予測の分野で発展し、既に実用化段階にある手法であるが、気象予測と都市風況とでは計算のスケールが異なるため、従来の同化の手法がそのまま都市風況に適用できるかは必ずしも自明でない。特に、都市風況の LES 解析では解像度が 1m 程度と細かく、水平数 km の領域を解析する場合の格子点数が 1~10 億のオーダーに及ぶため、これに比べて観測点数が極めて少なくなることが予想される。本研究では、そのような疎な観測が与えられた時のデータ同化の性質を調べ、都市風況 LES コードに対するアンサンブルデータ同化の適用可能性を探ることを目的とする。

3. 研究の方法

研究の目的に記載した通り、都市風況 LES へのアンサンブルデータ同化の適用は例が少なく、実現のためには基礎的な乱流計算の問題から検証を進めていく必要がある。このため、本研究では、都市風況 LES に直接アンサンブルデータ同化を実装するのではなく、以下の 2 点を実施することで手法の適用可能性を探る。

- (1) 乱流計算への適用および GPU 実装を前提として、これに適したデータ同化手法を選定する。
- (2) 基礎的な乱流問題を設定し、疎な観測に対するデータ同化の精度を検証する。

4. 研究成果

研究の方法 (1) (2) について、具体的に実施した研究の内容および成果を以下に示す。

(1) データ同化手法の GPU 実装と高速化

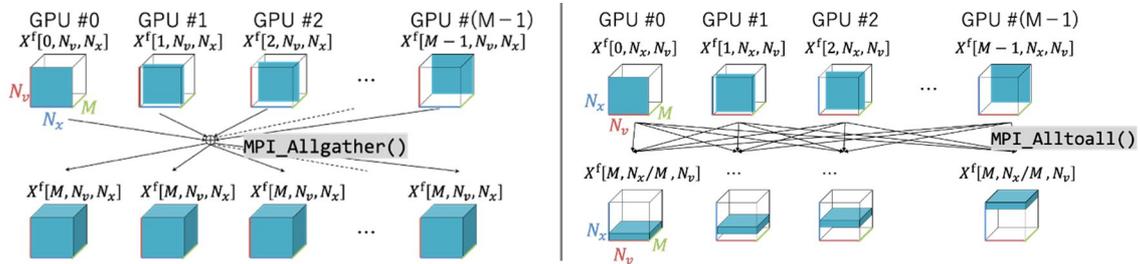
データ同化の手法としては、気象分野で実績があり、並列性に優れるとされる局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF) を採用した。LETKF は、GPU での実装の実績こそないものの、既往研究において CPU スパコン「京」や「富岳」に実装された実績 [2][3] があり、GPU スパコンに移植する際にも高い性能が得られることが期待されていた。

まず、LETKF を GPU に実装した上で、簡単な等間隔格子 LBM コードに適用し、 $128 \times 128 = 16,834$ 格子・64 アンサンブルの計算条件で計算時間を測定した。LETKF は、格子点数ごとに自明並列な手法であり、格子点数に比例して計算量が増大することから、本 LBM コードから任意の格子点数に対する LETKF の計算時間を見積もることが可能である。見積もりによると、1~10 億格子規模の都市風況 LES では LETKF の計算時間が実時間の 10~100 倍に及ぶこととなり、本研究で初めに実装した LETKF コードでは、都市風況 LES の実時間データ同化は到底実現できないことがわかった。

このため、次に LETKF の高速化に関する研究を開始した。第 1 に、固有値分解の高速化を行った。LETKF では、格子点数の数だけの行列演算を並列に行う実装、すなわちバッチ型演算の実装が行われており、その中の固有値分解が計算のボトルネックとなっていた。従来、固有値分解には CUDA の標準ライブラリである cuSOLVER のバッチ型 API (cuSolverDnSsyevjBatched) を用いていたが、同 API は 32×32 以下の行列にのみ対応しており、それ以上のサイズ

表 1 固有値分解ソルバの計算時間 [msec] (行列バッチサイズ: 16384)

Matrix size	cuSOLV ER [ms]	EigenGBatched [ms]	speedup
16×16	0.7	1.3	×0.53
32×32	4.1	2.4	×1.71
48×48	922.8	7.8	×118
64×64	927.4	14.2	×65.3



(a) All-gather 通信による Naïve 実装 (b) All-to-all 通信による最適化実装
 図 2 アンサンブルデータの通信パターン最適化の概念図。 N_v, N_x, M はそれぞれ、格子点あたりの変数、格子点数、およびアンサンブル数。メモリの並び順は C 言語の記法 (Row-major order) に従う

の行列ではバッチ演算が逐次処理に切り替わり性能が大幅に劣化することが明らかになった。そこで、固有値分解の高速化に関して理研計算科学センター (RCCS) に共同研究を依頼し、LETKF の行列データを提供し、これに適した固有値分解ライブラリとして EigenG-Batched を開発していただいた。cuSOLVER と EigenG-Batched の計算性能を比較した結果を表 1 に示す。64 アンサンブル計算の LETKF に相当する問題 (行列サイズ 64×64 、バッチサイズ 16384) の固有値分解において、EigenG-Batched は cuSOLVER に比べて 65.3 倍高速な演算を達成した。

第 2 に、固有値分解に加えてアンサンブルデータの通信の最適化を実施した。

Naïve な実装では、MPI_Allgather により全アンサンブルデータを集めて LETKF を解くといった比較的単純な実装を採用していた (図 2(a))。これに対し、通信用データ構造を SoA (Structured of Array) から AoS (Array of Structure) に組み替えて MPI_Alltoall で転値通信を行うことで、LETKF のバッチを複数 GPU に分散並列して解くように実装を最適化した (図 2 (b))。また、LETKF は観測値のファイル入力、アンサンブルデータ通信、行列演算 (GEMM) および固有値分解を含むため、この時のデータの依存性に基づき、通信とファイル入力や固有値分解演算のオーバーラップ処理を実装した。これらにより、流体計算 (LBM) とデータ同化 (LETKF) を合わせた計算全体の実行時間で換算して、EigenG-Batched による高速化からさらに 3.2 倍の高速化を達成した (図 3)。以上の最適化により、従来の実装に比べて、64 アンサンブル計算・16384 格子点の条件において LBM-LETKF の計算全体の実行時間で換算して 52.6 倍の高速化を達成した。

以上の高速化の成果により、高性能計算分野の国際会議 SC の併設ワークショップ ScalAH にて論文が採択された*1。

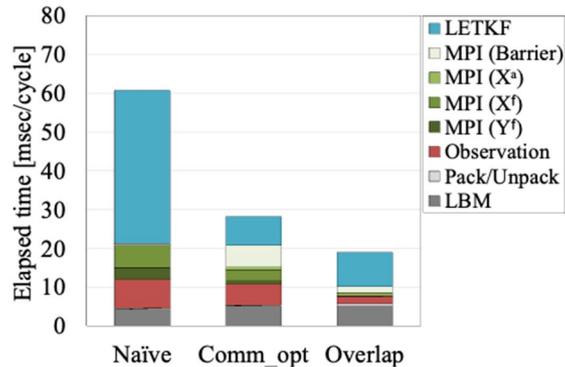


図 3 通信最適化によるデータ同化の計算時間の高速化効果 [msec/cycle] (アンサンブル数: 64)。Naïve: 当初実装、Comm_opt: 通信最適化実装、Overlap: 通信のオーバーラップ。

(2) 基礎的な乱流問題に対するデータ同化の精度検証

LETKF の精度検証をするための基礎的な乱流問題として、2 次元等方乱流を設定した。格子点数は 256×256 、計算ステップ数は 40,000 t 、観測・データ同化の頻度は 200 t につき 1 回と設定した。なお、観測の頻度は乱流の最大リアプノフ指数を参考に、十分細かい時間間隔となるように設定した (Labahn らの方法 [4] による)。データ同化の実験方法としては、観測システムシミュレーション実験 (OSSE) を用いた。すなわち、ある初期値で得られた計算結果を真値 (nature run) とし、真値を空間的に間引いて人工ノイズを印加したものを観測値とする実験である。観測のノイズの大きさは、速度の実効値 (RMS) の 10%、および、基準密度の 1% (密度変動の 10% 程度に相当) とした。観測の空間方向の間引き幅は $p = 1, 2, 4, \dots, 64$ とし、データ同化の誤差の変化を調べた。また、精度の比較として、より簡易なデータ同化手法であるナッジング [5] でも同様のデータ同化実験を行なった。

結果を図 4 に示す。図には真値、観測値、ナッジング、LETKF それぞれの渦度分布ナッジングでは、観測が粗いほど流れ場が空間的に平滑化される傾向が見られ、 $p \geq 16$ あたりからは定性的に見ても物理的に意味のない渦度分布が得られている。これは、ナッジングでは粗い観測値を線形補間した値を同化しているためである。一方で、LETKF では観測が粗い条件において、小スケールの渦は位置が真値と一致しなくなるものの、渦が消失することなく捉えられ続けている。これは、LETKF では観測の空間補間を行わず、計算格子点と隣接

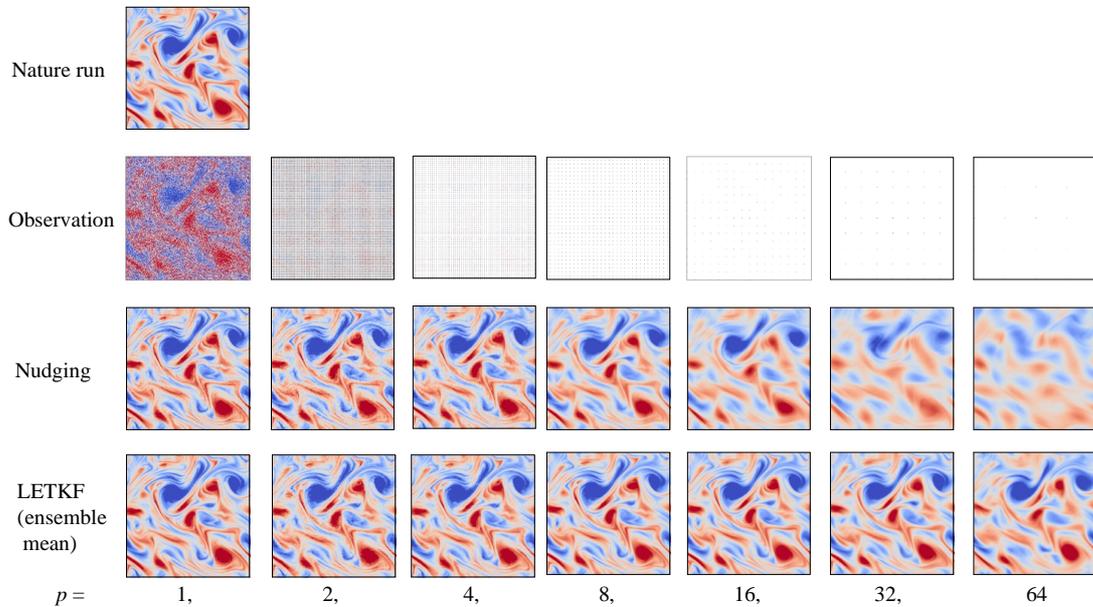


図4 2次元等方乱流の疎な観測によるデータ同化における渦度分布。 p は観測の間引き幅。格子点数は 256×256 であり、たとえば $p=64$ での観測点数は 4×4 。

する観測点の相関に基づいてデータ同化を計算するためである。LETKFは、空間補間のような流れ場を平滑化する効果を本質的に含まないことから、観測点が粗い条件において特に、ナudgingに比べてより物理に忠実なデータ同化を行うことができたと言える。

以上の精度検証の成果により、日本流体力学会の国際誌 *Fluid Dynamics Research* に論文が採択された*2。

なお、本研究の当初の予定では、データ同化コードの実装を2次元乱流だけでなく都市風況LESにまで進めることを予定していたが、その部分は未達である。これは、当初予定していたなかったLETKFの高速化の研究が必要になったこと、2次元乱流での精度検証に想定以上の時間を要したことが原因である。ただし、LETKFの、都市風況LESコード「CityLBM」への移植は完了しているため、今後の研究において同コードでの精度検証を行い、現実の風況におけるアンサンブルデータ同化の適用性の検討を進めていく。

主な研究成果リスト

- *1 Y. Hasegawa, T. Imamura, T. Ina, N. Onodera, Y. Asahi, and Y. Idomura, "GPU Optimization of Lattice Boltzmann Method with Local Ensemble Transform Kalman Filter," in *IEEE/ACM Workshop on Latest Advances in Scalable Algorithms for Large-Scale Heterogeneous Systems (ScalAH)* (2022)
- *2 Y. Hasegawa, N. Onodera, Y. Asahi, T. Ina, T. Imamura, and Y. Idomura, "Continuous data assimilation of large eddy simulation by lattice Boltzmann method and local ensemble transform Kalman filter (LBM-LETKF)," *Fluid Dynamics Research* **55**, 065501 (2023)

参考文献

- [1] N. Onodera, et al., "Real-time tracer dispersion simulations in Oklahoma City using the locally mesh-refined lattice Boltzmann method," *Boundary-Layer Meteorology* **179**, 187–208 (2021)
- [2] T. Miyoshi, K. Kondo, and T. Imamura, "The 10,240-member ensemble Kalman filtering with an intermediate AGCM," *Geophysical Research Letters* **41**(14), 5264–5271 (2014)
- [3] H. Yashiro et al., "A 1024-Member Ensemble Data Assimilation with 3.5-Km Mesh Global Weather Simulations," in *SC '20: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis* (2020)
- [4] J. W. Labahn, et al., "Ensemble Kalman Filter for Assimilating Experimental Data into Large-Eddy Simulations of Turbulent Flows," *Flow, Turbulence and Combustion* **104**(4), 861–893 (2020)
- [5] J. E. Hoke and R. A. Anthes, "The Initialization of Numerical Models by a Dynamic-Initialization Technique," *Monthly Weather Review* **104**, 1551–1556 (1976)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hasegawa Yuta, Imamura Toshiyuki, Ina Takuya, Onodera Naoyuki, Asahi Yuuichi, Idomura Yasuhiro	4. 巻 13
2. 論文標題 GPU Optimization of Lattice Boltzmann Method with Local Ensemble Transform Kalman Filter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 2022 IEEE/ACM Workshop on Latest Advances in Scalable Algorithms for Large-Scale Heterogeneous Systems (ScalAH)	6. 最初と最後の頁 10-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/scalah56622.2022.00007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hasegawa Yuta, Aoki Takayuki, Kobayashi Hiromichi, Idomura Yasuhiro, Onodera Naoyuki	4. 巻 108
2. 論文標題 Tree cutting approach for domain partitioning on forest-of-octrees-based block-structured static adaptive mesh refinement with lattice Boltzmann method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Parallel Computing	6. 最初と最後の頁 102851 ~ 102851
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.parco.2021.102851	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hasegawa Yuta, Onodera Naoyuki, Asahi Yuuichi, Ina Takuya, Imamura Toshiyuki, Idomura Yasuhiro	4. 巻 55
2. 論文標題 Continuous data assimilation of large eddy simulation by lattice Boltzmann method and local ensemble transform Kalman filter (LBM-LETKF)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Fluid Dynamics Research	6. 最初と最後の頁 065501 ~ 065501
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1873-7005/ad06bd	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 長谷川 雄太, 小野寺 直幸, 朝比 祐一, 井戸村 泰宏
2. 発表標題 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 (LETKF) の GPU 実装
3. 学会等名 第 27 回計算工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuta Hasegawa, Takayuki Aoki, Hironichi Kobayashi, Yasuhiro Idomura, Naoyuki Onodera
2. 発表標題 Tree cutting approach for reducing communication in domain partitioning of tree-based block-structured adaptive mesh refinement
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics & 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (WCCM-APCOM Yokohama 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長谷川 雄太, 小野寺 直幸, 朝比 祐一, 井戸村 泰宏
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第36回数値流体シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長谷川雄太、小野寺直幸、朝比祐一、井戸村泰宏
2. 発表標題 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)による二次元等方乱流のデータ同化
3. 学会等名 第28回計算工学講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長谷川雄太、井戸村泰宏、小野寺直幸、朝比祐一
2. 発表標題 格子ボルツマン法-局所アンサンブル変換カルマンフィルタにおける状態変数ベクトルの選定について
3. 学会等名 第37回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長谷川雄太、井戸村泰宏、小野寺直幸
2. 発表標題 GPU向け乱流アンサンブルデータ同化コードLBM-LETKFの開発
3. 学会等名 日本原子力学会2024年春の年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Y. Hasegawa
2. 発表標題 Exascale CFD plan in JAEA: Towards digital twin of urban wind environment
3. 学会等名 20th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------	---------