

jh180041-NAH

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

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は社会的な関心が非常に高く、緊急時における迅速性および正確性が求められている。本研究は昨年度の JHPCN 課題「格子ボルツマン法によるリアルタイム物質拡散シミュレーション手法の開発」に対して、GPU スパコンの NVLink を使用した高速な通信手法の実装、熱を考慮した物理モデルの導入、および、ナッジング法に基づくデータ同化手法を適用することで、都市街区の実時間風況解析手法を構築した。最終報告書では、東京工業大学の GPU スーパーコンピュータ TSUBAME3.0 での並列計算性能、解析手法の原子力分野への応用事例、および、オクラホマシティでの野外拡散実験に対する解析結果について報告する。

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、(役割分担) 解析手法の開発および解析結果の評価
- ・ 副代表者（東京工業大学）：
青木 尊之、(役割分担) TSUBAME での大規模計算に関する助言
- ・ 協力者（日本原子力研究開発機構）：
町田 昌彦、(役割分担) 解析条件の設定及び解析データの取得
井戸村 泰宏、(役割分担) 解析条件の設定及び解析手法の評価
- ・ 協力者（東京大学）：
下川辺 隆史、(役割分担) 解析手法の高速化に関する助言

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)やその世界版(WSPPEEDI)が用いられている[参考文献 1,2]。これらは観測されたデータを基に放射性物質の広域を対象とした拡散予測が可能である。さらに、日本原子力研究開発機構では、局地的な拡散挙動の予測精度の向上に向けて非圧縮性 Navier-Stokes 方程式に基づく非定常解析手法 (LOHDIM-LES)の開発[参考文献 3]を行なっているが、人が生活する路地や建物等を含んだ高解像度解析を行うためには、計算機性能を最大限に引き出すことの可能な解析手法の開発が必須となる。本課題では、GPU スパコンに適した格子ボルツマン法 (LBM) による乱流解析手法を構築することで、迅速性と精度を兼ね備えた予測システムの構築を目標とする。

本研究は、昨年度の JHPCN の採択課題「格子ボルツマン法によるリアルタイム物質拡散シミュレーション手法の開発」の継続課題であり、この手法に熱や植生等を考慮した物理モデルを導入することで、都市部での大規模的な熱対流構造や植生に依存する地表面付近の流れ場や汚染物質沈着の変化を解析に反映させる。以上の高度化により、風速および温度を無撞着に発展させ、さらに観測値およびメソスケールモデルと連携した解析が可能となり、信頼性の高い汚染物質の拡散予測システムの構築に貢献できる。

2.2 研究の意義

現在、汚染物質の拡散予測シミュレーションとして、SPEEDI や LOHDIM-LES 等[参考文献 1-3]を用いた解析が行われている。それらの解析手法は、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。さらに、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ることで、局所的な解析手法である LBM の外周部の境界条件として利用することで、高度な風況予測手法の構築が可能となる。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. 当拠点公募型共同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捉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。昨年度の JHPCN 課題では、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)法を開発することで、マルチスケールの風況解析を実現した。今年度も、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、GPU Direct RDMA や NVLink を用いた通信性能の向上が達成された。このように、TSUBAME3.0 を有効活用するためには、運用側との緊密な連携に基づく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の導入が必須である。

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。粒子の衝突過程は、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 4]。

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 10]。

4.3 テンポラルブロッキング法を用いた通信回数の削減アルゴリズムの開発

AMR 法を適用した並列計算では、計算プロセスの負荷分散による領域分割の複雑化、および、細分化レベル間の補間のための袖領域の増加など、隣接通信処理に伴うオーバーヘッドの増加が懸念される。特に、Leaf の格子点数が 4^3 ~ 8^3 等の領域に

対する袖部分の操作は、メモリの断片的な処理となり計算効率が低下すると共に、プログラミングが煩雑となる。一方で、袖通信において Leaf 内の格子点全てを転送する naïve な実装では、メモリアクセスが連続であると共にプログラミングが容易となる。しかしながら、LBM および解像度間の補間計算に不必要な格子点が通信され、計算速度が低下する。特に TSUBAME3.0 の様にノード内のメモリ帯域とノード間の通信帯域が大きく異なる場合、そのボトルネックが顕著となる。

テンポラルブロッキング(TB)法[参考文献 8]は計算のオーバーヘッドとなる領域の処理を別の処理に置き換えることで、オーバーヘッドの処理を数ステップの間は省略することが可能である。GPU を用いた並列計算においては、MPI 通信が大きなボトルネックとなるため、それを GPU 計算に置き換えることで高速化が期待できる。具体的には、通信が必要となる Halo 領域の Leaf に対して時間発展計算を行うことで、数ステップの間は通信を行わずに計算領域の時間発展が可能となる。以上の手法により、naïve な実装と比較して通信回数が削減できると共に、容易に AMR 法を実装することが可能となる。

4.4 風洞実験との比較・検証

大気環境アセスメント手法ガイドライン内[参考文献 9]にある産総研の風洞実験との比較・検証を行なった。風洞内には高さ $H=0.1\text{m}$ の立方体が配置され、その周囲の速度分布および汚染物質の濃度分布が計測される。解析では、立方体近傍格子に対して AMR 法を適用することで、全体を細かい格子で計算するのと比較して、4.2%程度の格子点数(合計 3781 万)での計算が可能となり、大幅なメモリの削減が実現された。また、少ない格子点数においても、LBM による風況解析の結果と実験による測定結果が良く一致することが確認され、AMR 法の有効性が示された。

大気環境アセスメントにある汚染物質の濃度分布結果との比較では、上記の風速分布に対して更に細かい格子($H/32, H/64$)を用いた解析したところ、実験結果への収束性が確認され、汚染物質拡

散解析の評価基準の一つの FAC2 値(汚染物質濃度の計算値が実験値のファクター 2 以内に収まる格子点の割合)として 0.89 以上が満たされた。

以上の結果より、前年度までに構築した汚染物質の拡散解析手法は、GPU による高速計算および AMR 法による大幅なメモリ削減が可能であると共に、大気環境アセスメントの基準値であるファクター 2 を満たせることが確認された。得られた研究成果を基に、原子力分野の査読付き国際会議にて発表を行なった(研究成果リスト 1)。

5. 今年度の研究成果の詳細

5.1 NVLink に対応した環境変数の設定および通信配列の最適化

前年度の課題として、MPI による通信時間のボトルネックが挙げられ、その高速化が急務となっていた。そこで、今年度の研究計画では、GPU Direct RDMA および NVLink を活用した通信性能の向上を挙げており、その通信の高速化を FY2018 の前半に行なった。

通信の最適化として、前年度は AMR 法の Leaf 単位ごとに MPI_Put による片方向通信を行っていたが、今年度は別の通信用配列に再格納し MPI_Isend・MPI_Irecv を用いて転送する手法に変更した。計算環境として、東京工業大学の TSUBAME3.0(T3) および 東京大学の Reedbush(RB)を利用することで、Omni-Path および Infiniband に対して、通信の高速化に必要な環境変数と実装手法を調査した。表 1 にそれぞれの環境変数を示す。

表 1 TSUBAME3.0 および Reedbush で設定した環境変数

TSUBAME3.0 (OpenMPI 1.10.7)	Reedbush (MVAPICH2-GDR 2.3a)
PSM2_CUDA=1	MV2_USE_CUDA=1
PSM2_GPUDIRECT=1	MV2_USE_GPUDIRECT=1
PSM2_MULTIRAIL=2	MV2_CUDA_IPC=1
	MV2_CUDA_ENABLE_MANAGED=1
	MV2_CUDA_MANAGED_IPC=1

測定条件として、表 2 に示す格子点を各プロセスに割り当てた。また、プロセス間の通信用配列

として、CPU の Host memory、GPU の Device memory、および Unified memory を設定し、ノード内(Intra-node)通信およびノード外(Inter-node)通信の性能を比較を行なった。

表 3 にノード内通信の 1 ステップ毎の計算時間を示す。計算時間の内訳として、“LBM”は格子ボルツマン法、“AMR”は AMR 法に関わる補間、青色の“comm”、“pack”、“unpack”は通信時間および通信配列への格納および展開、“others”は境界条件処理等の時間となる。T3 と RB のノード内の構成がほぼは同一(NVIDIA TESLA P100 × 4 台)であるため、計算部分(“LBM”, “AMR”, “others”)の時間は通信用の配列のメモリ形式に関係ないことが確認できる。一方で、Device memory を用いた通信では NVLink を用いた高速な転送が可能となるため、Host および Unified memory を用いた通信の 9 倍以上の高速化が達成された。また、Host memory を用いた通信では、計算で使用している Device memory と通信用の Host memory の転送が必要であるため“pack”, “unpack”の時間が大きくなっている。Unified memory を用いた通信では、GPU Direct RDMA の機能により Host memory を経由しない通信が可能となるが、NVLink を使用した高速化は確認されなかった。また、RB においては、“pack”“unpack”の時間が T3 と比較して大きく計上され、Unified memory に対する GPU Direct RDMA が正しく動作していないことが疑われる。

表 4 にノード外通信の 1 ステップ毎の計算時間を示す。ノード内通信の場合とは異なり、1 ノードあたり 1GPU を使用したため NVLink は使用されていない。ノード外通信においても Device memory を用いた通信が最も良い結果となった。しかしながら、ノード内通信と比較して T3 では 0.29 倍程度、RB では 0.5 倍程度の帯域幅となり、通信性能が顕著に悪化することが確認された。Host memory を用いた通信においては、ノード内通信と比較して速度の向上が見られるものの、Device memory 経由の通信よりも遅い結果となった。Host memory と Device memory での

Omni-Path 内の通信帯域は同程度であると考えられるため、環境変数等の設定が問題であることが考えられる。Unified memory を用いた通信においては、T3 では同様の結果が得られ、RB では性能低下が見られた。

以上の結果より、通信用配列に対して Device memory を用いることで、高速化が達成可能であることが確認された。

表 2 プロセスあたりの AMR 法の計算格子設定

AMR lv.	Time width	# of cells	Total cells (×10 ⁶)
0	Δt_0	80 × 80 × 128	0.819
1	$\Delta t_0/2$	160 × 160 × 128	3.276
2	$\Delta t_0/4$	320 × 320 × 128	13.107

表 3 ノード内(Intra-node)通信の計算時間 (msec/step)の内訳。4 プロセスにて実行。

Functions	msec (device)		msec (host)		msec (unified)	
	T3	RB	T3	RB	T3	RB
LBM	58.51	58.71	58.51	58.7	58.44	58.71
AMR	7.3	7.26	7.31	7.27	7.3	7.27
comm	6.74	7.59	69.66	57.14	59.63	54.33
pack	0.91	0.91	22.85	19.71	0.92	14.21
unpack	0.88	0.89	25.23	25.45	0.87	13.37
others	19.68	20.03	19.7	20.05	19.64	20.01
Total	94.03	95.39	203.3	188.36	146.82	167.94

表 4 ノード外(Inter-node)通信の計算時間 (msec/step)の内訳。4 プロセスにて実行。

Functions	msec (device)		msec (host)		msec (unified)	
	T3	RB	T3	RB	T3	RB
LBM	58.13	58.27	58.13	58.25	58.07	58.14
AMR	7.31	7.26	7.31	7.27	7.31	7.27
comm	23.38	15.19	42.74	41.75	58.94	69.25
pack	0.91	0.91	16.31	23.1	0.93	13.76
unpack	0.89	0.89	18.39	19.81	0.89	13.4
others	19.61	19.91	19.6	19.92	19.58	19.91
Total	110.27	102.44	162.52	170.14	145.74	181.77

5.2 TSUBAME3.0 での弱スケーリング性能

T3 にて弱スケーリング性能測定を実施した。計算条件として、表 2 の計算格子を設定および計算領域に対して X-Y 平面の 2 次元分割を行なった。

図 1 に T3 の弱スケーリング結果を示す。横軸がプロセス数、縦軸が 1 秒あたりの更新格子数 (MLUPS:Mega lattice update per second)となる。赤点が TB 法を採用した通信削減アルゴリズムの性能、青点が naive な実装による性能となる。また、黒の破線は 4 プロセスでのノード内通信の計算性能を基とした性能直線、灰色の破線が 4 プロセスでのノード外通信の計算性能を基とした性能直線である。いずれの計算結果も、灰色の性能直

線近傍に分布しており、良いスケールングが得られていることが確認できる。4GPU と 196GPU の並列化効率を比較した結果、通信削減アルゴリズムで 93%、naïve な実装で 80%の性能が得られると共に、通信削減アルゴリズムにて 83,538MLUPS の非常に高い実行性能が得られた。196GPU を用いた計算では、1m 格子を用いた $4,480 \times 4,480 \times 896 m^3$ の計算領域の確保が可能となり、AMR 法を採用することで、一様格子と比較して 19%の約 33 億格子にて計算が実現された。

以上の計算結果から、通信削減アルゴリズムおよび通信メモリの最適化により、良いスケールングおよび高速な計算を実現し、数 km 四方の実問題での実時間解析に必要な処理性能を達成した。以上の研究結果を基に、研究成果リスト 2 の成果が得られた。

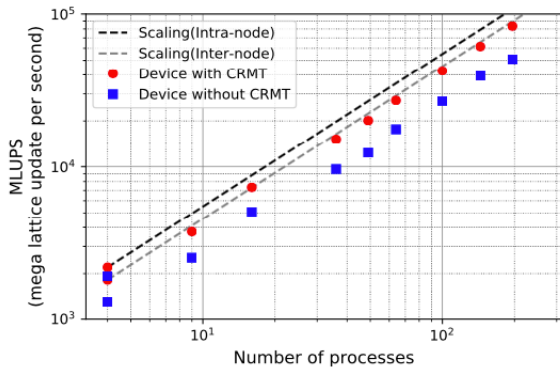


図 1 Tsubame3.0 での弱スケールング結果

5.3 格子ボルツマン法への熱流動モデルの導入

格子ボルツマン法を用いた熱流動解析手法として、様々な定式化が提案されている。本課題では熱の時間発展手法として、メモリの使用量に優れている事、都市街区を対象とした温度および格子解像度においては陽的な時間発展が可能である事より、差分法に基づく温度の時間発展手法を採用した。温度が LBM に与える影響はブジネスク近似を用いて外力項として評価した。温度の時間発展方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_j} = \left(\alpha + \frac{v_{sgs}}{Pr} \right) \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2}$$

ここで、 α は流体の温度拡散、 v_{sgs} はコヒーレント構造スマゴリンスキーモデルの渦粘性係数、 Pr はプラントル数となる。

5.4 デブリの空気冷却模擬実験との比較

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て、図 2 に示すような縦横高さ方向に $580 \times 580 \times 800 mm^3$ の三次元自然対流実験を行っており[参考文献 12]、それに対する検証計算を実施した。計算の境界条件として、中心から半径 250mm の底面に 420K の熱源を配置し、その他の底面は断熱境界条件、上面は 309.5K、内部側面は実験での外部側面温度および定常状態の熱伝導方程式により求められた近似式の $(320.27 - 17.131 \times z)$ より与えた。

図 3 に解析領域中心部での鉛直方向の温度分布を示す。それぞれ青丸が実験値、赤破線が非圧縮性 Navier-Stokes 方程式に基づく解析手法、実線が CityLBM の結果となる。解析結果より、実験値への収束性が確認された。以上の研究結果を基に、研究成果リスト 3 の成果が得られた。

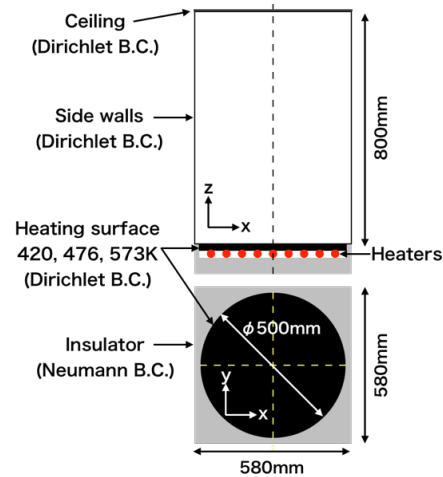


図 2 デブリの空気冷却実験の模式図

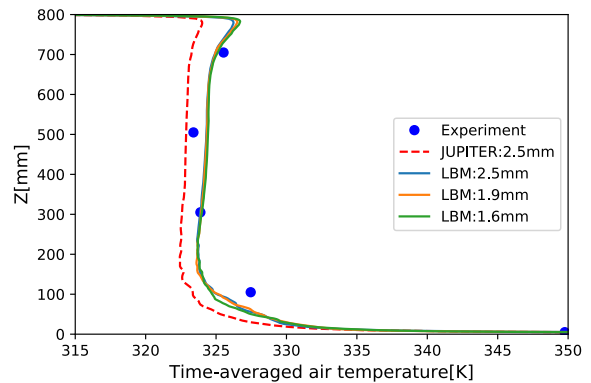


図 3 計算領域中心部の鉛直軸上での温度分布

5.5 オクラホマシティの野外拡散実験との比較

2003 年に実施されたオクラホマシティでの野外拡散実験[参考文献 13]に対する解析を行った。計算条件として、 $7680 \times 7680 \times 2560 \text{ m}^3$ の計算領域に対して、 4m^3 , 8m^3 , 16m^3 解像度の格子を高さ $0 \sim 256\text{m}$, $256 \sim 768 \text{ m}$, $768 \sim 2560 \text{ m}$ に配置した。地表面の境界条件として、建物の高さデータを市街地中心部の 1km 四方の領域に対して読み込むと共に、建物データが得られなかった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。風況および温度の境界条件として、WRF(Weather Research and Forecasting model)の計算結果を水平解像度 500m 、鉛直解像度 50m 、時間解像度 1 分間隔にて、計算領域の外周部および地表面に対して読み込んだ。

解析領域を図 4 に示す。汚染物質は、計算領域中心部の緑色の注釈の Botanical gardens(St.1)から、0900CDT、1100CDT、1300CDT の時刻より 30 分間の連続放出し、計算は 0700CDT から開始した。汚染物質の発生点(St.1)での風速および風向の鉛直分布を図 5 に示す。青線が LBM、赤線が WRF、黒丸が観測結果となる。風速の比較では、各時刻において LBM と観測結果が良く一致していることが確認できる。風向の比較では、LBM および WRF の結果が 60 度程度ずれている。この原因として、境界条件を読み込んでいる計算領域の端部分と解析領域の中心部が数 km 以上離れていること、および境界条件として与え

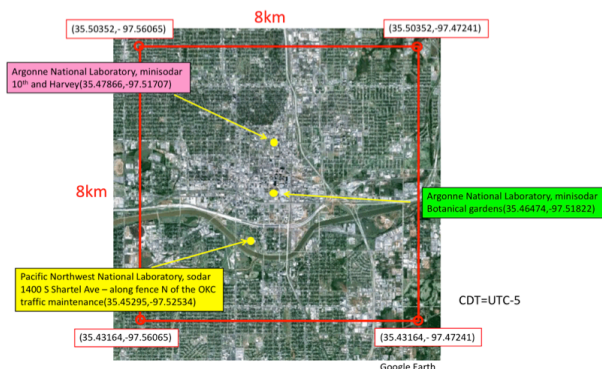


図 4 オクラホマシティ市街地でのマーカー物質の発生源および計測点。緑色の都市中心部にてマーカー物質の発生・風況測定を行っている。

ている WRF の風向自身も観測結果からずれていることが挙げられる。このような問題に対して、観測結果等を計算領域の内部にも読み込むことで、解析精度を上げることが望まれる。

図 6 に汚染物質が発生した市街地での汚染物質の可視化結果を示す。0900CDT から 30 分間連続放出されたマーカー物質が風下へと拡散していくことが確認できる。また、都市部の複雑な風の流れによる汚染物質濃度の濃淡など、実際の物理現象を良く再現している。

5.6 参考文献

1. M. Chino, et al. RADIATION PROTECTION AND DOSIMETRY (C5500), Vol. 16, Issue 9, pp.84, (1984)
2. H. Terada, et al. J. Nuclear Science and Technology, Vol. 41, No. 5, pp.632-640, (2004)
3. Nakayama, H., T. Takemi, and H. Nagai, Adv. Sc. and Research, 12, pp.127-133
4. Martin Geier, Martin Schönherr, et al., Comp. & Math. Applications, Vol. 70, Issue 4, pp.507-547
5. PH Kao, RJ Yang, J. Comp. Phys., 227 (11), pp.5671-5690
6. Stephen M. Guzik, et al., J. Comp. Phys, Vol.259, 15, pp. 461-487
7. O. Malaspinas, P. Sagaut, Phys. Fluids, 23 (2011), p. 105103
8. T. Shimokawabe, T. Endo, N. Onodera, T. Aoki, 2017 IEEE Int. Conf. Cluster Computing, DOI 10.1109 / CLUSTER. 2017.97
9. 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
10. N.Onodera and Y.Idomura, SCFA 2018: Supercomputing Frontiers 2018, pp 128-145, (2018)
11. Z.Chen, C.Shu, and D.Tan, Int. J. Heat Mass, 105, pp.741-757, (2017)

12. S.Uesawa, S.Yamashita, et al. Proc.25th Inter. Conf. Nuclear Engineering(ICONE25), (2017), pp.67517
13. M J Leach. Final report for the joint urban 2003 atmospheric dispersion study in oklahoma city: Lawrence livermore national laboratory participation. Oct 2005.

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

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の実現に向けて、GPU スパコンでの高速化に適した通信アルゴリズムの実装、および熱流動モデルの導入を行なった。進捗状況として、FY2018 の前半には、前年度の課題であった GPU 間通信の高速化を達成し、東工大 Tsubame3.0 にて良いスケールングが得られると共に、その研究結果を基に、研究成果リスト 2 の成果が得られた。

FY2018 の後半では、熱流動モデルの導入およびナッジング法に基づくデータ同化手法の導入を行った。本解析手法の原子力分野への応用として、デブリの空気冷却実験に対する解析を実施し実験結果が再現できることを示した。この研究結果を基に、研究成果リスト 3 の成果が得られた。都市部の風況解析として、オクラホマシティでの野外拡散実験に対する解析を行い、高解像度の実時間解析の実現、および、風速分布や汚染物質の拡散解析が可能であることを示した。以上より、本年度の目標である都市街区を対象とした拡散予測手法を構築することは達成できたと考えている。

平成 30 年度に実施できなかった課題として、植生モデル等の導入が挙げられる。この課題に対して、野外拡散実験の検証を進めていく上で導入したい。本課題は平成 31 年度に継続して実施される課題であり、物理モデルの高度化やアンサンブル計算に基づくデータ同化手法の導入により、解析精度を向上させていく予定である。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

(2) 国際会議プロシーディングス

1. N.Onodera and Y.Idomura, “Acceleration of Plume Dispersion Simulation using Locally Mesh-refined Lattice Boltzmann Method”, Proceedings of the 26th International Conference on Nuclear Engineering, (July 2018), 査読有
2. N.Onodera, Y.Idomura, Y.Ali, and T.Shimokawabe, “Communication Reduced Multi-time-step Algorithm for Real-time Wind Simulation on GPU-based Supercomputers”, 9th Workshop on Latest Advances in Scalable Algorithms for Large-Scale Systems (Scala) held in conjunction with SC18, (Nov. 2018), 査読有
3. N.Onodera, Y.Idomura, et al., “Fuel debris’ air cooling analysis using a lattice Boltzmann method”, Proceedings of the 27th International Conference on Nuclear Engineering, (May 2019), 査読有

(3) 国際会議発表

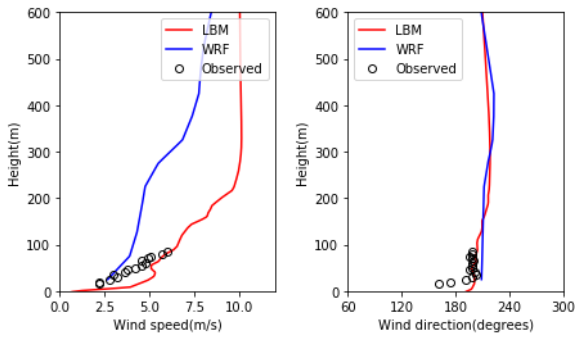
4. N. Onodera, Y. Idomura, et al., "Communication reduced multi-time-step algorithm for the AMR-based lattice Boltzmann method on GPU-rich supercomputers", The 1st R-CCS International Symposium, Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, (Feb 2019) , Poster, 査読無

(4) 国内会議発表

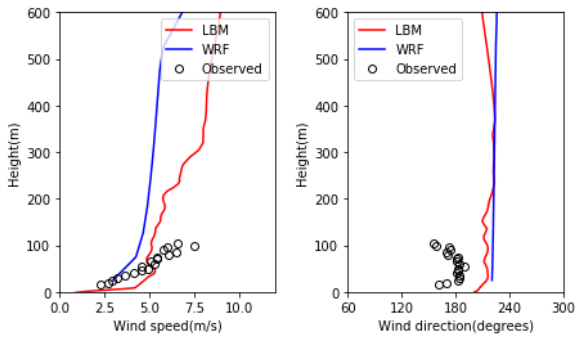
5. 小野寺直幸, 井戸村泰宏, “局所細分化格子を用いた格子ボルツマン法へのテンポラルブロッキング法の適用”, 第 23 回計算工学講演会, (May 2018), 査読無
6. 小野寺直幸, 井戸村泰宏, “適合細分化格子ボルツマン法による熱対流解析”, 第 32 回数値流体力学シンポジウム, (Dec 2018), 査読無

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

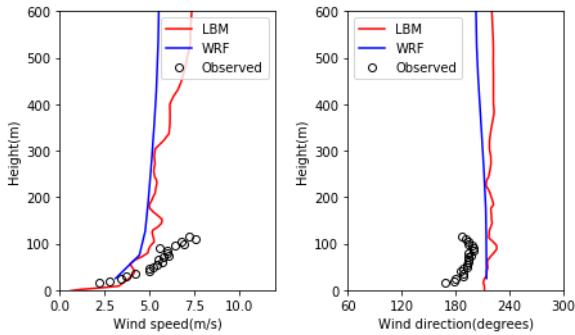
(a)1000CDT



(b)1100CDT



(c)1200CDT



(d)1300CDT

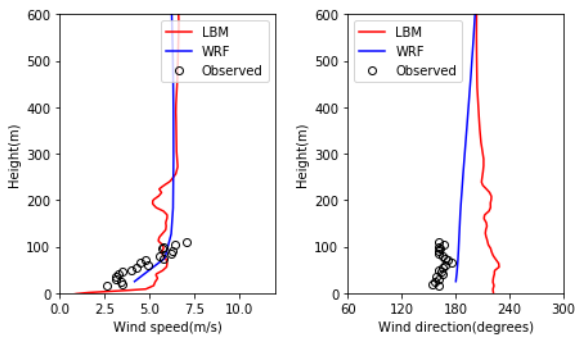
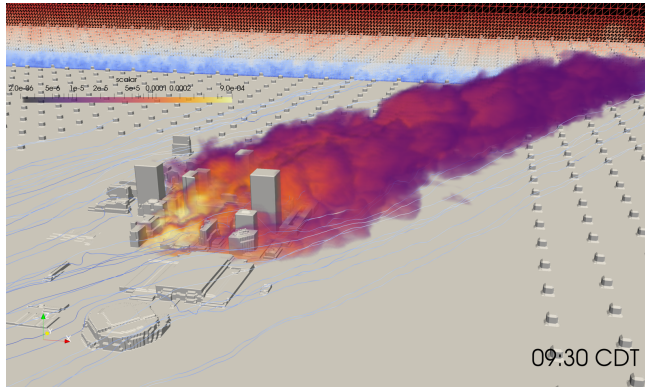
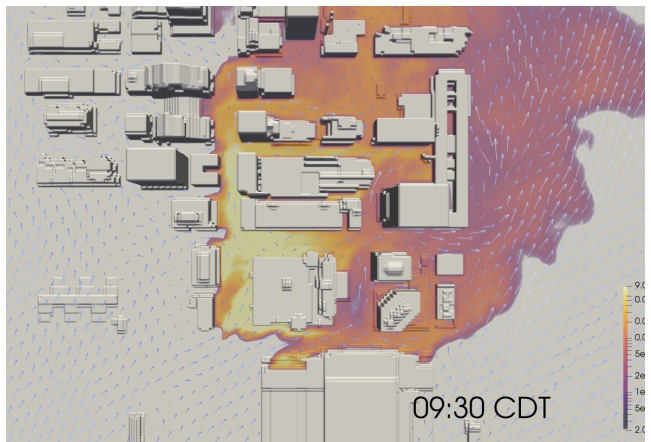


図 5 都市部での鉛直方向の風速および風向：赤線：LBM、青線：WRF、白丸：観測値

(i)



(ii)



(iii)

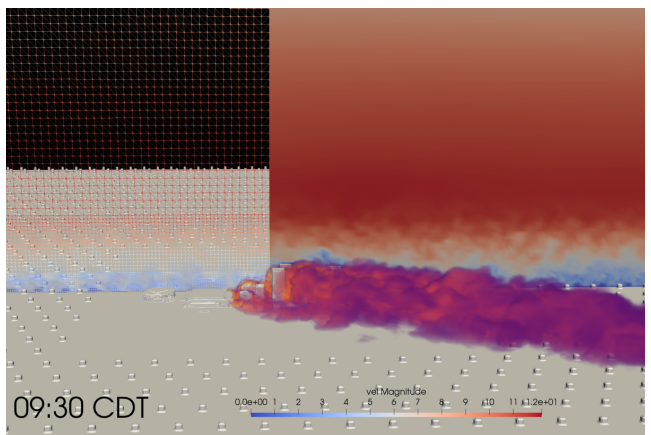


図 6 オクラホマシティ市街地での風況およびマーカーの可視化。(i) マーカーおよび流線、(ii) 地上 10m 水平断面内でのマーカー濃度、(iii) マーカーおよびマーカー発生源を含む断面内の速度分布。