

持続的な安全社会の構築に資する先端的マルチスケール環境予測シミュレーション法と周辺技術の開発

課題責任者

松田 景吾 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 地球情報科学技術センター

著者

松田 景吾^{*1}, 杉山 徹^{*1}, 後藤 浩二^{*2}, 松本 圭太^{*3}, 武内 太^{*3}

^{*1} 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門 地球情報科学技術センター, ^{*2} 日本電気株式会社, ^{*3} NEC ソリューションイノベータ株式会社

キーワード: MSSG, 微気象 LES, 局地的豪雨, 大気—海洋—地圏結合計算, ES4VE-ES4CPU ハイブリッド実行

1. 緒言

マルチスケール大気海洋結合モデル MSSG (Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment) [1, 2, 3] は, 全球, 領域, および都市街区スケールの大気海洋シミュレーションをシームレスに実行でき, 多様なプラットフォーム上での実行実績を持つ, 応用範囲の広いモデルである. 特に, 都市街区スケールでは, 気候変動に対する適応策の検討に資する予測情報の創出と提供のために, 都市街区の建物や樹冠を解像した微気象シミュレーションの実現と社会実装を進めてきた. これまでに, MSSG を用いて街区内の夏季暑熱環境の解析や, 暑熱環境改善策の評価等への活用を実現している. 一方で, 暑熱環境だけでなく豪雨等についても気候変動に伴う激甚化が懸念されており, 対象とする適応策の範囲を拡大するためには, MSSG 微気象シミュレーションにより降水過程を再現し, 都市構造や人工排熱等が降水過程に及ぼす影響を明らかにすることが重要である. そこで, 本課題では, 豪雨を対象に積乱雲と都市構造の両方が解像された MSSG 微気象シミュレーションの実現に取り組んだ.

また, 地表に降った雨水は地下に浸透し貯留されるとともに, 地表や雨水管を流れて河川や海に流出している. これらの地圏を含めた水循環が人間活動や気候変動によってどのように変化するかを明らかにすることも重要な課題である. そのため, これまでに COI サテライト拠点『水』大循環をベースとした持続的な『水・人間環境』構築拠点 (COI-S) において, 大気海洋結合モデル MSSG と地圏水循環モデル GETFLOWS [4, 5] を結合した大気—海洋—地圏結合シミュレータを開発した. この大気—海洋—地圏結合シミュレータについて, 地球シミュレータ (ES4) の多様なプラットフォームを活用した実行性能の改善について検討を行った.

2. 微気象モデルによる豪雨シミュレーション

大気海洋結合モデル MSSG の大気コンポーネントの力学過程は非静力学方程式系に基づいており, 支配方程式は, 密度, 運動量, 圧力, および水物質の輸送方程式である. 全球および領域スケールでは, 境界層モデルを用いた気象計算が可能である一方, 都市街区スケールでは, サブグリッドスケール乱流モデルを用いた計算格子サイズ

$O(1\text{ m})$ による建物解像 LES (Large-Eddy Simulation) を実行することができる[3]. 建物解像 LES では数値解法に fractional step 法を用いる. 乱流拡散には 1 方程式乱流モデル[6]を用いる. 建物と地形は voxel 法により陽的に解像される.

今回, MSSG 微気象モデルを用いて, 2008 年 8 月 5 日に東京 23 区内に長時間の局地的強雨をもたらした雑司ヶ谷豪雨を対象として, 解像度 20 m の雲・建物解像豪雨 LES を実施した. 計算領域は, 北緯 35.69°, 東経 139.71°を中心とする約 40.0 km × 38.4 km とした. 水平格子数は 2000×1920 である. 鉛直格子数は 145 とし上端高さ 25 km までの不等間隔格子を配置した. 図 1 に計算領域内の地形・建物高さ分布および土地利用分布を示す. 東京中心部の高層ビル等が解像されていることが確認できる. 対象時刻は, 09:00 JST から 13:00 JST とした. 大気場の初期値および境界値には, MSSG を用いた領域スケール気象計算により気象庁メソ数値予報モデルデータに基づいて 200 m 解像度までダウンスケールを行った結果を使用した. 計算領域を水平方向に 50×64 に分割し, ES4CPU の 50 ノードを利用して実行した.

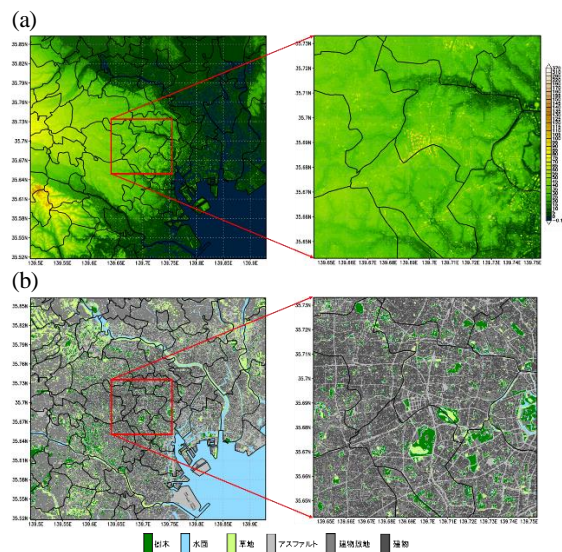


図 1 豪雨を対象とした微気象 LES の計算領域内の (a)地形・建物高さ分布および (b) 土地利用分布.

図 2 に、20 m 解像度の微気象 LES によって得られた 10:00 JST から 11:00 JST までの時間降水量の分布を、同時時間帯の 200 m 解像度の気象計算の結果およびレーダーアメダスのデータとともに示す。図より、気象計算の結果に比べて、微気象 LES では 12 mm 以上の降水が顕著に見られ、局所的な強い降水が現れていることがわかる。このような強い降水が現れる傾向はレーダーアメダスの結果とも類似している。今後、このような局地的豪雨に及ぼす都市の影響について詳細な解析を進める予定である。

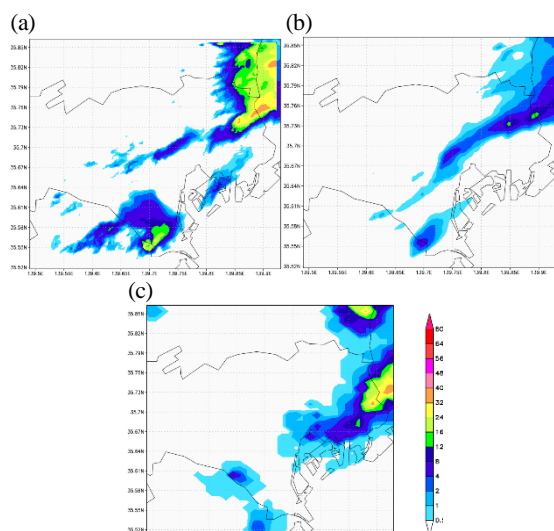


図 2 10:00 JST から 11:00 JST の時間降水量 (mm) の水平分布；(a) 微気象 LES (20 m 解像度)，(b) 気象計算 (200 m 解像度)，(c) レーダーアメダス。

3. ES4VE-ES4CPU ハイブリッド実行による大気—海洋—地圏結合シミュレーション計算性能の改善

COI-S プロジェクトでは、大気海洋結合モデル MSSG と地圏水循環モデル GETFLOWS [4, 5] を結合した大気—海洋—地圏結合シミュレータの開発が行われた。地圏水大循環モデル GETFLOWS は、スカラ計算機において効率よく計算が行われるように設計されているため、これまでスカラ計算機のみを用いて結合シミュレータの開発が進められてきた。一方、MSSG はベクトル計算機である地球シミュレータ (ES~ES3) において高速化が進められてきたため、ベクトルエンジン (VE) を搭載している VE ノード (ES4VE) を用いることで、より高速に実行できることが期待できる。そこで、今回、VE ノード (ES4VE) と CPU ノード (ES4CPU) の両方を搭載する地球シミュレータ (ES4) の特徴を活かし、ES4VE と ES4CPU でのハイブリッド実行による MSSG-GETFLOWS 結合シミュレータの計算性能の改善について検討した。

ハイブリッド実行環境の構築と性能評価は、関東流域圏に対する水平解像度 500 m の大気—海洋—地圏結合シミュレーションを対象に実施した。MSSG の格子点数は水平方向に 800×832 であり、大気側に 53 層、海洋側に 40 層の鉛直格子点がある。領域分割数は $64 (=4 \times 16)$ である。GETFLOWS の格子点数は水平方向に 440×550 、鉛

直方向に 42 層である。領域分割数は 59 である。性能評価のため、積分時間を 12 時間と短く設定した。

VE-CPU ハイブリッド実行では、MSSG を ES4VE で、GETFLOWS を ES4CPU で実行し、MSSG と GETFLOWS の間のデータ交換は NEC MPI で通信する。そのため、MSSG については nfort 3.5.1 と NEC MPI 2.21.0 を使用してコンパイルとリンクを行った。GETFLOWS については Intel コンパイラ 2022.1.2 と NEC MPI 2.21.0 を使用してコンパイルとリンクを行った。なお、MSSG と GETFLOWS の結合には OASIS ライブラリと netCDF ライブラリが用いられている。MSSG には MSSG と同様にコンパイルした OASIS ライブラリと VE 用の netCDF ライブラリ、GETFLOWS には GETFLOWS と同様にコンパイルした OASIS ライブラリと netCDF ライブラリをそれぞれリンクした。MSSG には ES4VE の 1 ノード (8VE, 64 プロセス) を、GETFLOWS には、ES4CPU の 1 ノード (2 ソケット, 59 プロセス) を割り当てて実行した。

性能の比較対象として、ES4CPU のみを用いた場合の性能評価も行った。その際、MSSG および GETFLOWS は、ともに Intel コンパイラ 2022.1.2 と NEC MPI 2.21.0 を使用してコンパイル・リンクした。MSSG の実行には ES4CPU の 4 ノード (8 ソケット, 512 プロセス) を、GETFLOWS の実行には ES4CPU の 1 ノード (2 ソケット, 59 プロセス) を割り当てた。なお、VE-CPU ハイブリッド実行の場合と同じソケット数 (リソースセット数) での比較を行うために、MSSG の分割数を増やした条件としている。

VE-CPU ハイブリッド実行の結果、ES4VE での MSSG の平均ベクトル長とベクトル演算率はそれぞれ、198.9 および 97.70% であった。MSSG の 1 領域 (プロセス) あたりの水平格子点数は 200×52 であり、ベクトル長が想定通り 200 程度となっていることが確認できる。また、ベクトル演算率が 95% を超えており、VE に適した計算が行われている。表 1 に VE-CPU ハイブリッド実行および CPU 実行の場合の実行時間を示す。ハイブリッド実行の方が、CPU のみでの実行の場合よりも約 1.68 倍高速であることがわかる。この高速化は主として ES4VE での MSSG の高速化に由来しており、VE-CPU ハイブリッド実行によって結合シミュレーションにおけるボトルネックの解消が実現できたことを示している。

表 1 MSSG-GETFLOWS 結合シミュレーションの ES4VE-ES4CPU ハイブリッド実行と ES4CPU 実行での実行時間の比較。

計算リソース	実行時間 (秒)
ES4VE-ES4CPU ハイブリッド MSSG : 8 VE GETFLOWS : CPU 2 ソケット	18 808
ES4CPU MSSG : CPU 8 ソケット GETFLOWS : CPU 2 ソケット	31 645

謝辞

本課題では、COI サテライト拠点『水』大循環をベースとした持続的な『水・人間環境』構築拠点(COI-S)において開発された大気—海洋—地圏結合シミュレータ(AOG シミュレータ)を用いた。

文献

- [1] K. Takahashi, R. Onishi, Y. Baba, S. Kida, K. Matsuda, K. Goto, and H. Fuchigami, “Challenge toward the prediction of typhoon behavior and down pour”, *J. Physics* 454, 012072 (2013).
- [2] W. Sasaki, R. Onishi, H. Fuchigami, K. Goto, S. Nishikawa, Y. Ishikawa, and K. Takahashi, “MJO simulation in a cloud-system-resolving global ocean-atmosphere coupled model”, *Geophys. Res. Lett.* 43, 9352–9360 (2016).
- [3] K. Matsuda, R. Onishi, and K. Takahashi, “Tree-crown-resolving large-eddy simulation coupled with three-dimensional radiative transfer model”, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 173, 53–66 (2018).
- [4] H. Tosaka, K. Itoh, and T. Furuno, “Fully coupled formulation of surface flow with 2-phase subsurface flow for hydrological simulation”, *Hydrological Process*, 14, 449–464 (2000).
- [5] 稲葉薫, 登坂博行, 平井卓, 吉岡真弓, “熱・水循環系統合モデルの構築—熱・流体移動の定式化と解析的検討—”, *土木学会・水工学論文集*, 51, 469–474, (2007).
- [6] J. W. Deardorff, “Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model”, *Boundary-Layer Meteor.* 18, 495–527 (1980).