

複雑地形・都市街区を対象にした LES 気象モデルの開発

Development of Local Meteorological Model based on LES Model

- 池田 亮作, 筑波大学大学院生命環境科学研究科, 〒305-8572 茨城県つくば市天王台 1-1-1,
E-mail: s1030237@u.tsukuba.ac.jp
日下 博幸, 筑波大学計算科学研究センター, 〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1
飯塚 悟, 名古屋大学大学院環境学研究科, 〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町 D2-1(510)
朴 泰祐, 筑波大学大学院システム情報工学研究科, 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1
Ryosaku Ikeda, Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1
Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki 305-8572
Hiroyuki Kusaka, Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennoudai,
Tsukuba, Ibaraki 305-8577
Satoru Iizuka, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, D2-1(510), Furo-cho,
Chikusa-Ku, Nagoya, Aichi 464-8601
Taisuke boku, Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba, 1-1-1
Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki 305-8573

We have been developed local meteorological model based on LES model with generalized curvilinear coordinate system. Several model verification tests are performed. From these results it can be concluded that at present, our model is correctly developed, at least with regarding the dynamics, physics, boundary conditions, and coordinate transformation. For further verification, numerical tests over steep slope mountains were performed. It is shown that models using the z^* coordinates simulates results with computational error over steep slope mountains, but remarkable numerical error was not found with the generalized curvilinear coordinate system even when the slope angle is 59.0° . Finally, parallel computation tests are performed on the super computer, T2K-Tsukuba. As a result, the parallelization efficiency is confirmed to be about 0.45 when 1024 processors are used.

1. はじめに

気象モデルの高解像度計算の一手段として LES が注目されている。気象分野における LES 計算は、主に理想計算を対象としてきたので、地形の導入はなく地面は平坦であるものが多い。地形を表現できる LES として、直交座標系を採用したモデル^{(1), (2)}や、地形に沿った座標系を用いたモデル⁽³⁾などがある。後者の座標系の場合、急峻な地形に対しては座標変換誤差が大きくなることが指摘されている。そこで、本研究では一般曲線座標系を導入し地形の効果を取り入れた。また、大規模計算を想定した計算コードの並列化を行う。

2. モデル概要

基礎方程式は、主に大気境界層を対象とすることからブジネスク近似方程式を採用する。

$$\begin{aligned}\frac{\partial \bar{U}_m}{\partial \xi_m} &= 0, \quad \bar{U}_m = J \frac{\partial \xi_m}{\partial x_i} \bar{u}_i \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial \bar{U}_m \bar{u}_i}{\partial \xi_m} &= -\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_m} \left(J \frac{\partial \xi_m}{\partial z} (c_p \theta_0 \bar{\Pi}') \right) \\ &+ \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_m} \left[J \frac{\partial \xi_m}{\partial x_j} \left\{ -\tau_{ij} + \nu \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_n} \left(J \frac{\partial \xi_n}{\partial x_j} \bar{u}_i \right) \right\} \right] + \frac{g}{\Theta_0} \bar{\theta}' \delta_{i3} + F_i \\ \frac{\partial \bar{\theta}'}{\partial t} + \frac{1}{J} \frac{\partial \bar{U}_m \bar{\theta}'}{\partial \xi_m} &= \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_m} \left[J \frac{\partial \xi_m}{\partial x_j} \left\{ -\tau_{\theta j} + \kappa \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi_n} \left(J \frac{\partial \xi_n}{\partial x_j} \bar{\theta}' \right) \right\} \right]\end{aligned}$$

座標系は一般曲線座標系を採用した。格子系はデカルト座標での

物理量を格子中心、反変速度を格子境界に定義するコロケーション格子を採用した。数値計算アルゴリズムは SMAC 法、時間スキームは移流項に 2 次精度 Adams-Bashforth 法、拡散項に Crank-Nicolson 法、空間スキームは 2 次精度中央差分を採用する。圧力に関する Poisson 方程式は Bi-CGStab 法で解く。これらの数値計算アルゴリズム、スキームについては、名古屋大学飯塚准教授のモデル⁽⁴⁾をベースにしている。サブグリットの乱流モデルは、標準的なスマゴリンスキーモデルと、サブグリット乱流エネルギーからサブグリットの乱流拡散係数を求める Deardorff(1980)のモデル⁽⁵⁾を導入している。側方境界条件は、周期境界、勾配 0 の条件、放射境界条件のいずれか。上部境界での重力波の反射を防ぐために、領域上層に Rayleigh damping 層を設ける。摩擦係数は Klemp and Lilly の方法⁽⁶⁾に従う。

3. モデル検証

モデルの検証は、開発した LES モデルの力学、物理モデル、地形（座標変換）、境界条件が正しく計算できているか、また大気成層が考慮できているかを確認するために行うものである。

(1) 中立大気境界層流れ、混合層発達の数値実験

中立大気境界層における流れ場、大気成層を導入し地表面顕熱フラックスを与えた混合層発達の数値シミュレーションを行った。

はじめに中立大気境界層流れの検証実験について述べる。地衡風速は 15 ms^{-1} 、温位勾配は中立、基準温位は 288 K 、地表面顕熱フラックスは 0 W m^{-2} 、地表面粗度長は 0.1 m とした。アンサンブル平均モデルと異なり、初期値として乱流場を与えなければならないが、ふさわしい乱流場を計算対象ごとに与えるのは難しい。ここでは、適当な乱数を初期の風速、温位場に対して上乗せしたものを初期値として用いた。乱数は

$$\Delta u / u_g = \Delta \theta / \theta_0 \sim 0.01$$

程度になるような小さな数を上乗せした。図1左は積分開始から9000秒後の水平風速の領域水平平均からの偏差である。図1の水平断面図は10%境界層高度のものである。境界層高度は470mで、風向が上空地衡風の風向に一致する高度とした。境界層の下層では図1のように周りに比べて風速が強い領域と弱い領域が交互に縞状になっている様子が見られる。上空に行くにつれてこのような構造は無くなっていき、 $0.8z_g$ の高度では全く見られない(図省略)。これらの特徴は既存研究⁶⁾の中立大気境界に対する計算にも見られるものである。

次に混合層発達の数値実験について述べる。地衡風速は 10ms^{-1} 、温位勾配は 0.004Km^{-1} 、基準温位は 288K 、地表面温度を初期の地上温位より 5K 高く設定し、地表面粗度長は 0.1m とした。中立大気境界層に対する数値実験と同様に、初期擾乱として乱数を上乗せした。図1右は積分開始から18600秒後の水平風速からの偏差である。図は10%混合層高度のものである。中立の場合、境界層下層の地面付近では縞状の構造がみられたが、混合層下層ではそのような構造は見られない。この特徴は既存研究⁷⁾においても見られるものである。また、乱流エネルギー収支も既存研究と同様の結果が得られた。

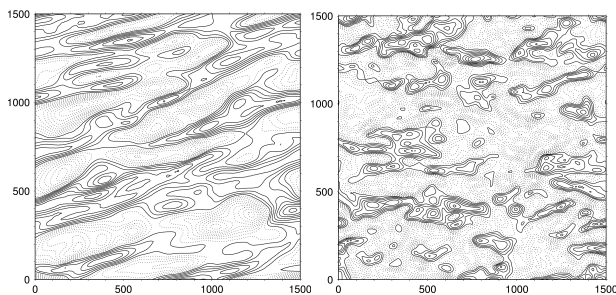


Fig. 1 Contours of flow variables in the x-y plane at $z/z_g = 0.1$ for Shear driven flow (Left), and buoyancy dominated flow (Right).

(2) サーマルの数値実験

初期風速は 0ms^{-1} 、温位勾配 0.004Km^{-1} 、基準温位 300K 、地表面フラックス 0.24Kms^{-1} と設定しサーマルの数値計算を行った。格子間隔は 20m 、格子数は $100 \times 100 \times 100$ 点で4000秒の数値積分を行った。図3は4000秒後の鉛直速度である。地表面近くでは(図2左)、六角形の網目状構造が見られ、その網目の結節点で最も上昇流が強くなっている。この地点から混合層上端にまで達する強い上昇流(サーマル)が形成されている様子が分かる(図2右)。この結果は既存研究でも指摘されているものである⁸⁾。

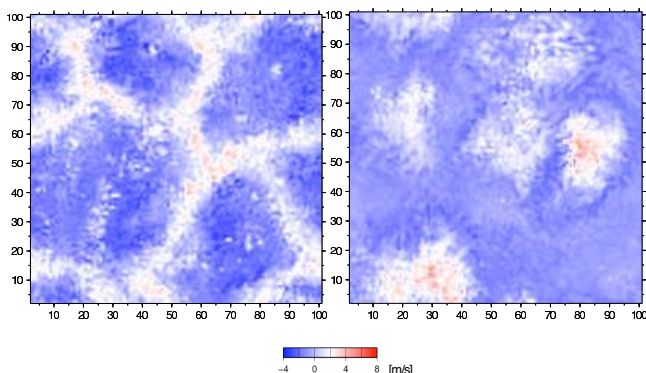


Fig. 2 X-Y cross-sections of the vertical velocity at $z=0.2z_g$ (Left) and $z=1.0z_g$ (Right), $T=4000\text{s}$.

(3) 山岳波の数値実験

このモデル検証は、LES としての検証ではないが、大気成層が考慮され、座標変換、境界条件が正しく計算できているかを確認するために行う。山岳波のモデルによる計算値は線形解と比較することで検証した。検証はスコラー数を変化させ、山上伝播型、風下山上伝播型、減衰型の3種類について数値実験を行い、それぞれ線形感と一致していることを確認した(図省略)。

(4) 急斜面の流れ場に対する数値実験

さらに、山の傾斜角を急にして計算が安定に実行できるかを検証した。計算領域の中心にベル型の山をおき、山の平均傾斜角が $45^\circ, 51.3^\circ, 59.0^\circ$ の3パターンについて計算を行った。プラントバイサラ振動数は 0.02 、スコラー数は 0.002 、山の高さを 100m とし計算を行った。 z^* 座標系の場合、傾斜がきつくなるほどノイズが目立つようになるが、一般曲線座標で格子を切った場合は傾斜が急になった場合についても、ノイズを発生させることなく計算できた(図3)。一方、 z^* 座標系であっても、山の半値幅に対して10格子以上と高密度に格子を切ればノイズは目立たなくなった。

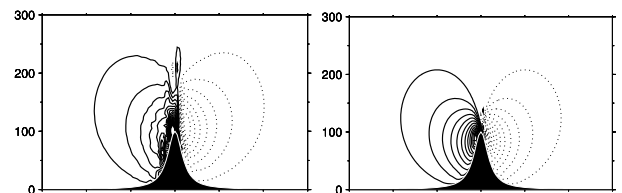


Fig. 3 Vertical velocity after 10 minute integration. The left figure is z^* coordinate system and the right figure is generalized curvilinear coordinate system.

4. モデルの並列化

現実場を対象としたLES計算をする場合、膨大な格子数により計算負荷(メモリ使用量や計算時間)が非常に高くなる。このような大規模演算によるメモリの確保、計算時間の短縮のために、LESコードの並列化を行った。並列化は Message Passing Interface(MPI)を用い、並列計算は T2K-Tsukuba を利用した。T2K-Tsukuba は全体で648ノードからなり、各計算ノードには quad-core Opteron(2.3GHz)プロセッサが4台搭載されている。ピーク演算性能は 95.4Tflops である。1ノード当たりのメモリ容量は 32GByte で、全ノードは4本の Infiniband DDR(1本当たりのピーク性能 $2\text{GByte/sec/direction}$, 合計 $8\text{GByte/sec/direction}$)を Fat-Tree 接続したネットワークで構成されている。

並列計算の領域分割は鉛直方向には分割せず、2次元分割とした。まず、Strong Scaling で並列化効率を測定した。Strong Scaling とは格子点数は変えずに使用するプロセッサ台数を増やしていく方法である。格子点数を $320 \times 320 \times 100$ とし混合層発達の計算を行った。並列計算の結果、128コアまでは並列化効率0.8と高く、1024コアでも0.45程度得られることが分かった(図4)。

次に Weak Scaling でテストを行った。Weak Scaling とはプロセッサ当たりの問題サイズ(格子点数)を固定し、プロセッサ台数を増やしていく方法である。混合層発達計算を対象とし、途中100ステップ分の時間計測を行った。1プロセッサ当たりの格子点数を $50 \times 50 \times 50$ とし計算を行った。その結果、16プロセッサ以上ではほぼ計算時間は変わらず、1024プロセッサでの計算時間は16プロセッサでの計算時間より約10%長くなる程度であった(図5)。

Strong scaling で並列化効率がコア数が増加するにつれて落ちていくのは、粒度が細かくなることが主な要因である。Weak scaling での結果が良好であることからこのことが言える。

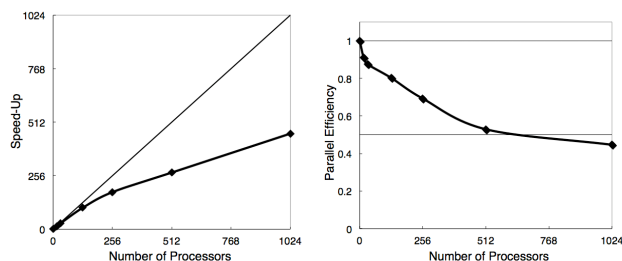


Fig. 4 Parallel performance for the Strong scaling test: The left figure is Speed-up versus number of processors; and the right figure is Parallel efficiency.

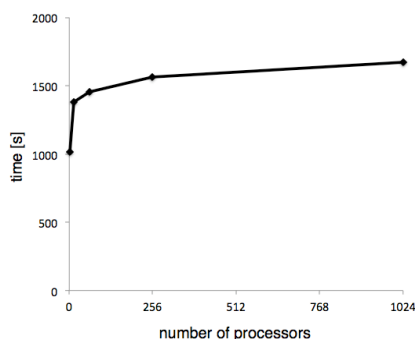


Fig. 5 Parallel performance for the Weak scaling test, in which the number of grid points per processor remains the same. Total time for the simulations is plotted versus number of processors used.

5. 都市街区を対象としたモデル

建物解像 LES 気象モデルは直角座標系で別に構築している。基礎方程式系はブシネスク近似方程式。座標系は直角座標系、格子系はArakawa-C グリッドを採用した。数値計算アルゴリズムは Fractional Step 法、時間スキームは移流項に 3 段階の Runge-Kutta 法、拡散項はオイラー陽解法、空間スキームは 2 次精度中央差分である。SGS モデル、物理モデル、境界条件等は一般曲線のモデルと同様である。建物は 0-1 マスキングで表現する。すなわち、流体部は 1、建物部は 0 とする方法である。

建物を解像したテスト計算として、正方形型のブロックを計算領域に 9 個おき流れの計算を行った。格子間隔は 0.1m、ブロックは 16 格子で解像（ブロックサイズは 1.6m）、大気は中立、風速 5ms^{-1} で 1 時間の数値積分を行った。図 6 は建物高さの 1.2 倍高度の風速偏差である。風速が周辺よりも遅い領域が筋状に連なる低速ストリークが見られる。この特徴は既存研究でも指摘されているものである⁽⁹⁾。他、乱流統計量の鉛直分布も既存研究と比べて良好な結果が得られた(図省略)。

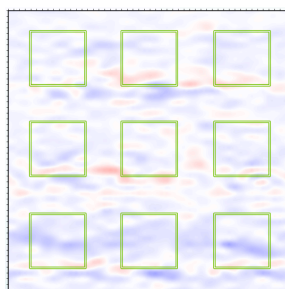


Fig. 6 X-Y horizontal cross-section ($z = 1.2h$) of spanwise velocity component ($u'' = U - \langle U \rangle$). The blue area marks low-speed streaks.

6. まとめ

一般曲線座標系で地形を導入した LES 気象モデルを開発している。いくつかの検証実験を行い、モデルの力学・物理モデル、座標変換、境界条件、大気成層が考慮され正しく計算できているか確認した。また、急斜面を対象とした実験を行った結果、一般曲線座標系では 59.0° でも数値エラーを発生させることなく安定して計算できることを確認した。最後に並列化のテスト計算を T2K-Tsukuba で行い、Strong Scaling で並列化効率が 128 コアでは 0.8、1024 コアでは 0.45 得られることが分かった。

謝辞：本研究は特別研究員奨励費(23・477)の助成を受けたものである。本研究の開発の一部は、文部科学省の委託事業「気候変動適応研究推進プログラム」において実施したものである。本研究で実施した数値シミュレーションは、筑波大学計算科学研究センター学際共同利用プログラムで実施された。

参考文献

- (1) Raasch, S., and M. Schröter, 2001: A large-eddy simulation model performing on massively parallel computers. *Meteorol. Z.*, 10, 363-372.
- (2) 余偉明, 2008: 複雑地形と直線直角座標形の LES 気象領域モデル開発. 気象研究ノート, **219**, 21-26.
- (3) Chow, F. K., A. P. Weigel, R. L. Street, M. W. Rotach, and M. Xue, 2006: High-resolution large-eddy simulations of flow in a steep Alpine Valley. Part I: Methodology, verification, and sensitivity experiments. *J. Appl. Meteor. Clim.*, 45, 63-86.
- (4) Iizuka, S., H. Kondo, 2004: Performances of various sub-grid scale models in large-eddy simulations of turbulent flow over complex terrain. *Atmospheric Environment*, 38, 7083-7091.
- (5) Deardorff, J. W., 1980: Stratocumulus-capped mixed layer derived from a three-dimensional model. *Bound.-Layer Meteor.*, 18, 495-527.
- (6) Klemp, J. B., and D. K. Lilly, 1978: Numerical simulation of hydrostatic mountain waves. *J. Atmos. Sci.*, 35, 78-107.
- (7) Moeng, C.-H., and P. P. Sullivan, 1994: A comparison of Shear- and Boundary-Driven Planetary Boundary Layer Flows. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 999-1022.
- (8) Kanak K. M., D. K. Lilly, and J. T. Snow, 2000: The formation of vertical vortices in the convective boundary layer. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 2789-2810.
- (9) Kanda, M., R. Moriwaiki and F. Kasamatsu, 2004: Large eddy simulation of turbulent organized structure within and above explicitly resolved cubic arrays. *Bound.-Layer Meteor.*, **112**, 343-368.