

都市街区を対象にした並列 LES 気象モデルの開発

*池田 亮作（筑波大院生命環境）， 日下 博幸（筑波大計算科学研究センター）
飯塚 悟（名古屋大環境学研究科）， 朴 泰祐（筑波大システム情報工学研究科）

1. はじめに

気象観測点のうち歴史的に長期間観測が行われている観測点の多くが都市部に位置している。その気温変化は都市化の影響を大きく受けていると考えられており、建物や樹木による観測データに与える影響が、定性的な問題提起の段階ではあるが指摘されている(例えば Runnalls and Oke 2006)。すなわち、観測点周りの局所的な環境の変化(樹木の成長や、土地利用の変化)が原因で、気温の観測データに影響を与えていると言われている(日だまり効果, 近藤純正ホームページ)。本研究では、都市街区の計算が可能な LES モデルを開発し、開発したモデルを用いて建物や公園、樹木が局所的な気温分布にどの程度影響を与えるかを評価する。また、LES での大規模計算、計算の高速化を図るためにコードの並列化を進める。

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。座標系は直交座標系、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Runge-Kutta法、拡散項はオイラー前進差分。空間スキームは2次精度中央差分である。LESのサブグリッド乱流モデルは、スマゴリンスキーモデル(Smagorinsky 1963, Lilly 1966, Sullivan et al. 1994)と、Deardorff(1980) の1方程式型SGSモデルを導入しており、いずれかを選択。圧力に関するPoisson方程式はBi-CGStab法で解く。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。地形も0-1マスキングで階段状に表現する。側方境界条件は、周期境界、勾配0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(1978)に従う。

3. モデルの検証

構築したLESモデルの検証として、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。開発した LES モデルにおいて、流れ場や乱流エネルギー収支の特徴がよく再現された。

次にサーマルの数値実験を行った。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 $102 \times 102 \times 102$ 点で 4000 秒の数値積分を行った。図1は 4000 秒後の鉛直速度と温位フラック

ス($\langle w' \theta' \rangle / Q^*$)の鉛直プロファイルである。地表面近くでは、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示された。この結果は既存研究でも指摘されているものである(例えば, Kanak et al. 2000)。

また、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2は建物高さの0.5倍、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(例えば, Kanda et al. 2004)でも指摘されているものである。他に、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。

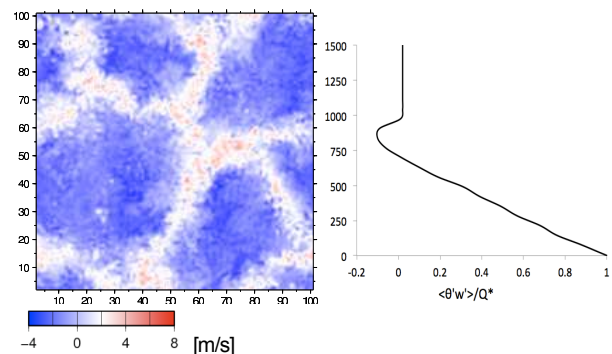


図1: サーマルの数値実験。左図は $z=0.2z_t$ の鉛直速度の水平断面図。右図は温位のフラックス($\langle w' \theta' \rangle / Q^*$)の水平平均鉛直プロファイル。グリッドスケールとサブグリッドスケールを足し合わせた値。両図とも $T=4000[\text{s}]$ 。

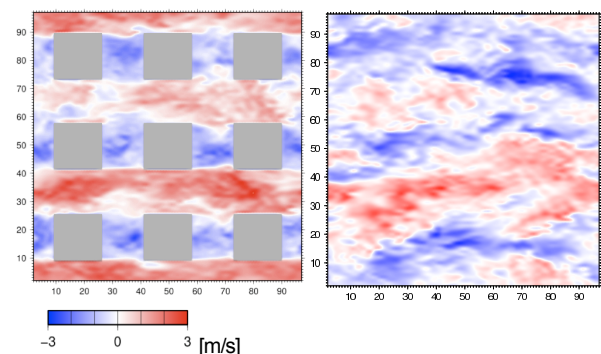


図2: 建物を解像した数値実験。 $z=0.5h$ と $z=1.2h$ での主流方向の風速偏差($u''=U-U$)の水平断面図。

4. 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 2GByte/sec/direction, 合計 8GByte/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。サーマルの計算を対象に格子点数を 320x320x100 として並列計算を行った。その結果、128 コア並列のとき並列化効率 0.73 であった (図 3 左)。

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。1 プロセッサ当たりの格子点数を 50x50x100 として、サーマルを対象とした計算を行った。時間計測は途中の 1000 ステップ分を対象とした。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、128 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 5%長くなる程度であった(図 3 右)。

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るのは、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。

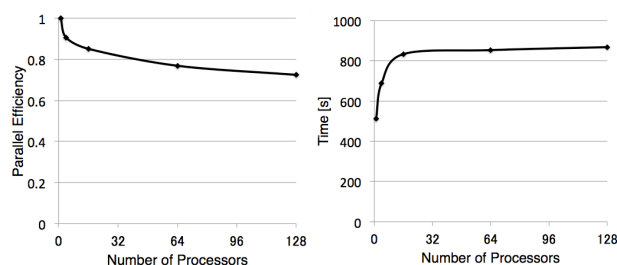


図 3: 並列計算の結果。左図は Weak-Scaling でテストした並列化効率。右図は Strong-Scaling で時間計測をした結果。共に 1, 4, 16, 64, 128 コアで計算。

5. 今後

公園や街路樹の樹木を表現する必要があるが、木を直

接解像することは困難なため、植生キャノピーモデルが必要であり、現在導入中である。また、構築中の LES モデルに雲微物理モデルには Kessler(1969)の改良版を、放射モデルには灰色大気を仮定したモデル (Mahrer, and Pielke (1977)の改良版) を導入中である。

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、GPU による計算加速化もさらに平行して進めていく。

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

- Deardorff, J. W., 1980: Stratocumulus-capped mixed layer derived from a three-dimensional model. *Bound.-Layer Meteor.*, 18, 495-527.
- 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.
- Kanda, M., R. Moriawaki and F. Kasamatsu, 2004: Large eddy simulation of turbulent organized structure within and above explicitly resolved cubic arrays. *Bound.-Layer Meteor.*, 112, 343-368.
- Kessler, E., 1969: On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation. *Meteor. Monogr.*, 32, Amer. Meteor. Soc., 84pp.
- Klemp, J. B., and D. K. Lilly, 1978: Numerical simulation of hydrostatic mountain waves. *J. Atmos. Sci.*, 35, 78-107.
- 近藤純正. 近藤純正ホームページ
<http://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/index.html>
- Lilly, D. K., 1966: On the application of the eddy-viscosity concept in the inertial subrange of turbulence. Manuscript No. 123, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO.
- Mahrer, Y., R.A.Pielke, 1977: A numerical study of the airflow over irregular terrain. *Beitrage zur Physikder Atmosphere*, 50, 98-113.
- Runnalls, K.E. and T.R., Oke, 2006: A technique to detect microclimatic inhomogeneities in historical records of screen-level air temperature. *J. Climate*, 19, 959-978.
- Smagorinsky, J., 1963: General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment. *Mon. Wea. Rev.*, 91, 99.
- Sullivan, P. P., J. C. McWilliams, and C. H. Moeng, 1994: A subgrid-scale model for large- eddy simulation of planetary boundary layer flows. *Boundary-Layer Meteorol.*, 71, 247.