

〔小特集〕京による最新計算事例の紹介

広領域・高解像度実験のための気象 LES モデルの開発

*理化学研究所 計算科学研究機構

西澤 誠也†
 佐藤 陽祐
 八代 尚
 宮本 佳明
 吉田 龍二
 富田 浩文
 Team SCALE

Development of atmospheric LES model for large-domain and high-resolution experiments

Seiya NISHIZAWA, Yousuke SATO, Hisashi YASHIRO, Yoshiaki MIYAMOTO,
 Ryuji YOSHIDA, Hirofumi TOMITA, Team SCALE,

Advanced Institute for Computational Science, RIKEN

1 はじめに

大気システムにおいては、水滴や氷塊の成長、積乱雲などの対流活動、高・低気圧、台風、偏西風ジェットなど、様々なスケールの現象が密接に関係している。したがって、気象現象のシミュレーションを行うためには、広いダイナミックレンジの現象を解像する必要があり、広い計算領域かつ高い解像度が求められる。しかしながら、実際には、計算資源の制約から陽に解像する現象のダイナミックレンジを狭める必要がある。さまざまな仮定や経験式を用いるなど、先達の多大な努力の結果、遠近的視点で見れば、現実大気に近いシミュレーションを行うことが可能となってきている。

しかし、モデルで再現された個々の現象をみると、必ずしも現在の大気シミュレーションが成功しているとは言えない。全体としてつじつまがあうように無数の調整が施された結果、そのしわ寄せは個々の現象に押しつけられ、モデルの中では非現実的な現象が計算されていることは珍しくない。このような問題が表面化すると、さらなる高度な調整が施されるといったように、現在の気象モデルはモデル職人

による経験と勘にもとづく匠の技と言うべき調整の上に成り立っているといても過言ではない。素人が下手に一部のみの修正を行うと、たとえそれが明らかなプログラムバグの修正であったとしても、全体のバランスが崩れて、モデルの再現性が悪くなることが多々ある。どなたであったか失念してしまったが、「現代の気象モデルはまるでジェンガのごとし」とおっしゃっていたが、言い得て妙である。

この状況を変えるための一つの方法は、できる限り経験式や近似を少なくした第一原理に近いシミュレーションを行うことで、調整すべき“つまみ”の数や範囲を減らすことである。その時代に出来る限りの広領域で高解像度の実験を行うことで陽に解像できる現象の範囲を広げることや、さまざまな物理過程を物理法則に基づきより高度に精緻化することなどにより、不確定な要素を可能な限り減らす事が可能である。これにより、気象・気候シミュレーションの信頼性を向上させることができる。

これらのことから、我々は、できる限り広領域かつ高解像度な実験を可能とする気象 LES (Large Eddy Simulation) モデル (SCALE-LES; web page: <http://scale.aics.riken.jp/>) の開発を行っている。設計

*〒650-0047 神戸市中央区港島南町 7-1-26

† E-mail: s-nishizawa@riken.jp

段階から計算科学研究機構の計算機科学の専門家と密接に連携することで、効率的な計算機資源の利用のための工夫をこらすとともに、複数ある数値計算スキームから広領域・高解像度実験に適したものを調べて採用している。2節では SCALE-LES の説明、3節では SCALE-LES を用いた計算例の紹介を行う。

2 SCALE-LES

SCALE-LES の最大の特徴は、完全陽解法を採用していることである。既存のほぼすべての気象モデルでは、時間積分に(多くの場合部分的にはあるが)陰解法を用いることで、最も速い位相速度をもつ音波を陽に解かない。これにより、時間刻み幅を大きく取ることが出来る。多くの場合、鉛直方向にのみ陰解法を用いるが、これは、通常気象モデルでは、鉛直解像度に対する水平解像度の比(以下、アスペクト比)を大きくとるためである。アスペクト比を大きくとる理由は、大気自体が浅いという幾何学的特徴を持っていることに加え、重力の存在により多くの気象現象は水平2次元的であり、水平解像度に比べて鉛直解像度を十分小さく取る必要があるためである。しかしながら、空間スケールが小さくなるほど運動は等方的なため、高解像度実験ではアスペクト比を1に近づける必要がある。すると、鉛直方向に陰解法を用いるメリットは小さくなる。また、陰解法を用いると、アルゴリズム的に数値計算において並列処理が出来ない部分が増えるという問題もある。以上の理由から、SCALE-LES では将来のシミュレーションを想定し、完全陽解法を採用した。

格子は、直交座標系で、運動量とスカラー量の定義位置をずらしたスタッガード格子 (Arakawa-C grid) を用いている。空間微分に関しては、音波に関わる項には二次中央差分、それ以外には四次中央差分を、時間積分は3段の Runge-Kutta 法をそれぞれ用いている。フラックス形式での記述により運動量や密度等の保存を、フラックス修正法¹⁾により微量成分の非負を保証している。粗過程として、Smagorinsky-Lilly タイプのサブグリッドスケール乱流モデル²⁾、2-moment バルク雲微物理モデル³⁾、ピン法雲微物理モデル⁴⁾、下面フラックスバルクモデル⁵⁾等を実装している。

3 計算例

3.1 重力流実験

気象モデルの力学過程の検証として標準的に用い

られるベンチマークテストとして、重力流実験⁶⁾がある。ドメイン中央に冷気塊を置いた初期値から実験を行うと、冷気塊は地面付近まで下降した後、重力流として水平方向に進んでいく。重力流上部の冷気と暖気の境界では、Kelvin-Helmholtz(KH)不安定が生じ、渦が発達し冷気と暖気が効率的に混合する。

標準ベンチマークである Straka et al. (1993) の設定では、決定論的にテストを行うべく、強い粘性拡散を入れているため、細かな構造は生じない。そこで、不安定による渦の微細構造を見るため、ここでは、陽には物理的な粘性拡散は入れない実験を行った。ただし、数値安定性のため、高階の数値粘性は入れている。計算ドメインは、Straka et al. (1993)と同じく水平 51.2km、鉛直 6.4km の2次元である。空間解像度は 1.5625m として実験を行った。

図1は、時刻 570 秒における温位の分布である。重力流は左から右方向に進んでおり、重力流の上方および後方に、KH 不安定による螺旋状の渦が出来ていることが分かる。また、この螺旋構造自体が KH 不安定の条件であるシアと密度差をもっているため、二次不安定による螺旋状の渦が出来ていることが見える。このフラクタル的な構造は、さらに高次の不安定による螺旋構造の存在を示唆している。これらの不安定は、暖気と冷気を効率的に混合し、陽に粘性・拡散を入れなくとも、巨視的に見れば粘性・拡散があるような振る舞いをする。これは渦拡散と呼ばれるが、有限の解像度で実験を行う場合は、渦拡散は必須であることが分かる。

3.2 スコールライン実験

スコールラインは、積乱雲が線状に組織化し、次々に新しい積乱雲を生み出す活発な気象現象であり、しばしば非常に強い降雨をもたらす。防災の観点からも重要な現象であるため、これまで多くの研究が行われてきた。スコールラインの維持メカニズムは以下の通りである。ライン上に存在する積乱雲により生じた降雨は地面付近で蒸発し気化熱を奪うことで空気を冷やす。冷やされた空気塊(コールドプー

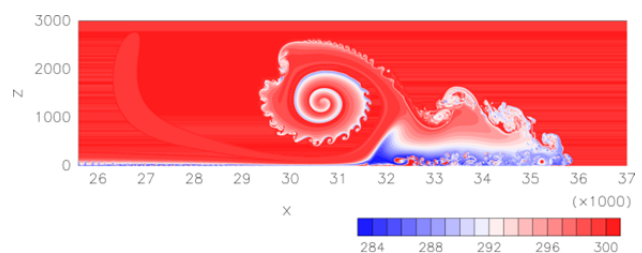


図1. 重力流実験での時刻 570 秒における温位の水平-鉛直平面分布。重力流の進行方向は図の右方向である。

ル)は、重力流としてスコールライン前面に進み、そこにある相対的に暖かい空気を持ち上げる。持ち上げられた空気内では水蒸気の凝結が起こり、気化熱を放出する。この加熱による正の浮力が上昇流を強化し、積乱雲となり雨を降らす。降った雨は地表付近で蒸発しコールドプールを強化する、という循環がおこり、長時間にわたり積乱雲が次々と何世代も立ち続ける。このように、スコールラインが維持されるメカニズムは知られているものの、個々の積乱雲の大きさや、積乱雲がもたらす雨の強さなどには、小さなスケールの乱流運動が密接に関わっており、従来行われてきた実験の解像度では定量的な議論を行うことは難しい。また、粗い解像度の実験においては、雲壁面における乱流による混合を考慮しないと、再現される積乱雲の強度が強くなりすぎる傾向があることが知られている。

そこで、積乱雲およびスコールラインに対する乱流の効果を見るため、高解像度での実験を行った。実験設定は、GCSS (GEWEX (Global Energy and Water Exchanges) Cloud System Study) における国際モデル間比較プロジェクト⁷⁾のスコールライン実験の設定に合わせた。計算領域は、水平 150km×230km、鉛直 27km とし、解像度は 50m とした。ただし、領域の端は解像度を粗く設定した。

図 2 は、時刻 4.5 時間における結果の水平-鉛直断面図である。このスコールラインは図 2 の左から右に向かって進行している。下層 1km に -2 度程度のコールドプールが形成されており、その前面が 104km 付近まで進んでいる。そこでは、上昇流と、それに伴う高さ 4km 程度の対流雲が形成され、活発

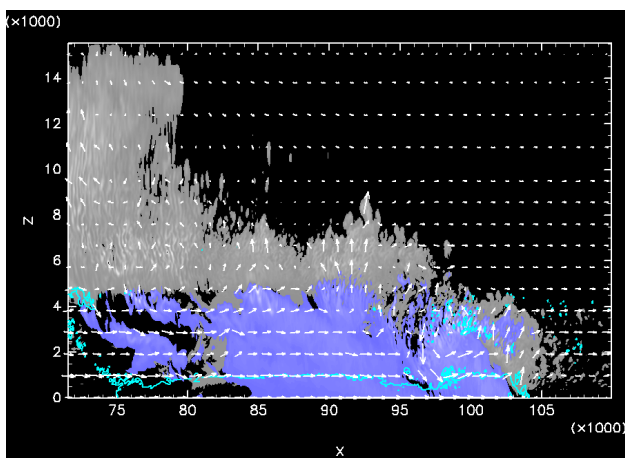


図 2. スコールライン実験での時刻 4.5 時間における雨水混合比(寒色; 2g/kg 以上)、雨水以外の水物質の混合比(白黒; 0.1g/kg 以上)、温度の初期値からの偏差(等値線; -2K)、および風速(ベクトル)の水平-鉛直断面図。

に雨を降らせている。その後方 93km および 85km 付近には、前世代の積乱雲が高度 8km 付近まで成長しており、80km より後方では高度 15km 付近まで到達する積乱雲に発達しているといったように、何世代にもわたる積乱雲の存在が確認できる。また、雲内部に 200~300m 程度の空間スケールをもつ構造がみられており、雲内の微細な乱流構造が解像されていることが分かる。

3.3 層積雲実験

層積雲はカリフォルニア西岸や、チリ沖、ナミビア沖をはじめとした大陸西岸によく発生する雲であり、恒常的に存在しているため太陽放射をよく反射する。そのため地球のエネルギー収支に大きな影響を与える。気候変動予測において重要な現象であるため、これまで数値モデルを用いたいくつかの研究がなされてきた。しかしながら、層積雲は、非常に薄く、鉛直方向に物理量が急激に変化する構造をしているため、その再現には数 m~数十 m 程度といった高い解像度での実験が不可欠である。また、層積雲の生成・維持・崩壊過程のメカニズムには雲内部や雲の周辺の微細な乱流が大きく関わっているため、そのメカニズム解明にはより高解像度な実験が必要であり、未だ解明されていない部分が多い。

そこで、微細な乱流の構造の影響を調べるため、高解像度実験で層積雲の再現を試みた。計算設定は GCSS における国際モデル間比較プロジェクト⁸⁾の層積雲実験になった。計算領域は水平 3.36km×3.36km、鉛直 1.5km であり、水平方向には周期境界条件である。ただし、解像度は、GCSS の設定では水平 35m、鉛直 5m であるのに対し、ここでは、水平、鉛直ともに 5m とした。積分時間は 4 時間である。

図 3 は計算開始から 3 時間後の層積雲の雲水混合比である。計算領域全体を覆うように対流にともな

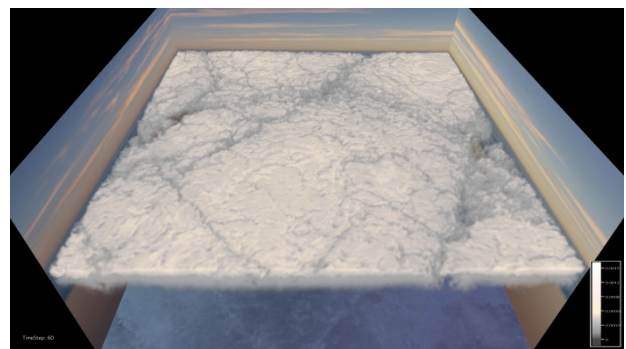


図 3. 計算開始から 3 時間後の層積雲の雲水混合比。背景の空および海面はイメージである。

う五角形のセル構造が雲により可視化されている。また、領域の右端中央付近にはクラウドホールと呼ばれる雲がない領域が存在している。これらの大きな構造に加え、乱流により生じる雲の微細な構造が至る所に見られる。これらの特徴は航空機観測などの観測結果の特徴とよく一致している。

4 まとめ

我々は、より信頼性の高い気象シミュレーションのため、広領域・高解像度実験を可能とする気象 LES モデル (SCALE-LES) の開発を行っている。これまで、重力流や、スコールライン、層積雲等の実験を通して、モデルの妥当性や高解像度実験のインパクトの検証を行っている。

今後は、本モデルの部分要素を取り出した気象・気候モデル開発のためのライブラリ (SCALE; Scalable Computing for Advanced Library and Environment) を開発し、本モデルとともにオープンソースソフトウェアとして公開していく。そして、将来の HPC (High Performance Computing) の動向も見据えながら、全球 LES も視野に入れた将来の気象・気候シミュレーションの基盤を築いていきたいと考えている。

謝辞：本モデル開発は、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用して行われている。本稿に掲載した図の描画は、Dennou Ruby Project (<http://www.gfd-dennou.org/library/ruby/>) の製品群 (図 1, 2)、および Vapor (<http://www.vapor.ucar.edu/>) (図 3) を利用して行った。

引用文献

- 1) Zalesak, S.T.: Fully multi-dimensional flux-corrected transport algorithms for fluids, *J. Comput. Phys.*, 31 (1979) 335-362.
- 2) Brown, A.R., Derbyshire, S.H., & Mason, P.J.: Large-eddy simulation of stable atmospheric boundary layers with a revised stochastic subgrid model, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 120 (1994) 1485-1512.
- 3) Seiki, T., & T., Nakajima: Aerosol effects of condensational process on a convective cloud system, *J. Atmos. Sci.*, (submitted).
- 4) Suzuki, K., Nakajima, T., Nakajima, T.Y., & Khain, A.P.: A study of microphysical mechanisms for correlation patterns between droplet radius and optical thickness of warm clouds with a spectral bin microphysics model, *J. Atmos. Sci.*, 67 (2010) 1126-1141.
- 5) Uno, I., Cai, X-M., Steyn, D.G., & Emori, S.: A simple extension of the Louis method for rough surface layer modeling, *Boundary Layer Meteorol.*, 76 (1995) 395-409.
- 6) Straka, J.M., Wilhelmson, R. B., Wicker, L.J., Anderson, J.R., & Droegemeier, K.K.: Numerical solutions of non-linear density current: A benchmark solution and comparisons, *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 17 (1993) 1-22.
- 7) Redelsperger, J.-L., Brown, P.R.A., Guichard, F., Hoff, C., Kawasima, M., Lang, S., Montmerle, T., Nakamura, K., Saito, K., Seman, C., Tao, W.K., & Donner, L.J.: A GCSS model intercomparison for a tropical squall line observed during TOGA-COARE. I: Cloud-resolving models, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 126 (2000) 823-863.
- 8) Stevens, B., Moeng, C.-H., Ackemann, A.S., Bretherton, C.S., Chlond, A., de Roode, S., Edwards, J., Golaz, J.-C., Jiang, H., Khairoutdinov, M., Kirkpatrick, M.P., Lewellen, D.C., Lock, A., Muller, F., Stevens, D.E., Whelan, E., & Zhu P.: Evaluation of large-eddy simulations via observations of nocturnal marine stratocumulus, *Mon. Wea. Rev.*, 133 (2005) 1443-1462.