

4. 下層雲の LES とその気候研究への応用

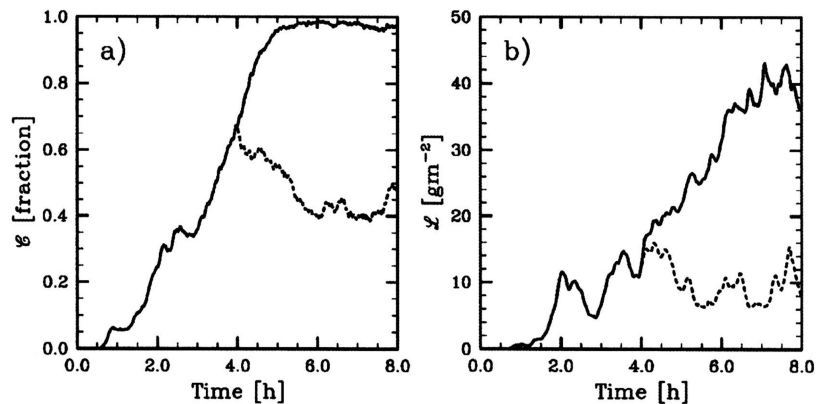
野田 暁*

1. 下層雲の重要性

下層雲は高いアルベドを持つとともに年平均で全海洋上の23%, 全陸上の17%に及ぶ広い領域を覆うことで地球の放射収支に極めて強い影響を与えている。将来気候予測の信頼性向上のためには全球気候モデル(Global climate model, GCM)において現実大気の下層雲の時空間的特性が十分に再現されていることが望まれる。しかし現状の下層雲の予測精度は、徐々に改善が為されてはいるもの

の、いまだ多くの問題を含んでいる (Bony and Dufresne 2005; Wang and Su 2013; Noda and Satoh 2014c)。

これ程までに下層雲の再現が困難な理由はその形成過程の複雑さにある。下層雲は地球表面と大気境界層、下部自由大気の間で起こる乱流輸送過程、雲微物理過程、放射過程の間の相互作用を介して存在している。その一例として、放射過程が層積雲に及ぼす影響を見てみよう (第1図)。シミュレーションの途中で放射過程の影響を排除するや否や、雲の振舞いは大きく変化している。下層雲の数値予測精度を向上させるためには複雑な相互作用を理解し、更に、その過程を可能な限り精度良くパラメータ化しなければならない。



第1図 LESによる下層雲(層積雲に覆われた積雲)の時間発展。(a)全雲量と(b)鉛直積算雲水量。実線は放射過程を含む場合、点線は計算開始から4時間後に放射過程を切った場合。(Stevens *et al.* 2001)

パラメタリゼーションの開発とその検証を行う上では下層雲を伴う境界層過程の詳細なデータが不可欠であるのだが、現実には限られた観測のみに依存してその十分なデータを得ることは極めて難しい。そこで白羽の矢を立てられたのがラージエディシミュレーション(Large-eddy simulation, LES)である。限られた下層雲の観測データと整合する様にLESを行い、そこで得られた時空間に密なデータを疑似的に観測データとみなし、これに整合させる様にパラメタリゼーションを開発しようとする試みが今日まで進められている。更に、現実の大気中では不可能な感度試験を手軽に行うことができることもLESを活用する利点である。これにより、多様な物理過程の相対的な重要性を知る手掛かりとなる。これらの一連の活動と気候研究との繋がりについては野田・中村(2008)、吉森ほか(2012)にもまとめられている。本稿ではこれらの文献では紹介しきれなかった興味深い研究成果に

* 海洋研究開発機構, a_noda@jamstec.go.jp

© 2015 日本気象学会

ついて報告したい。

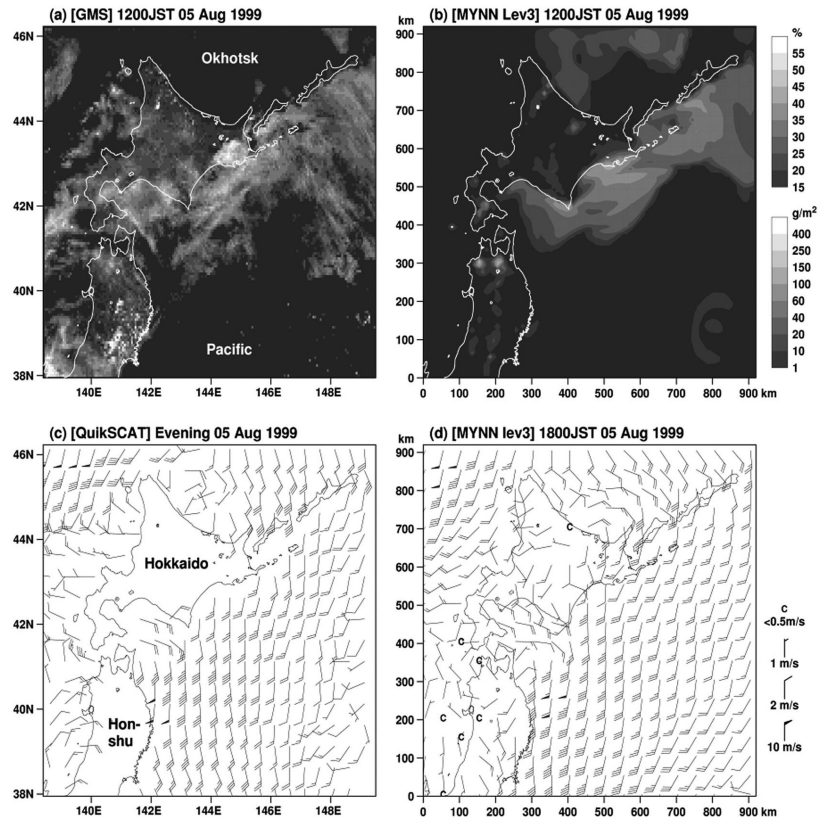
2. LESの応用

LESとはエネルギー輸送の主たる担い手である乱流渦の運動を陽に計算するシミュレーションのことであり、これによりサブグリッドスケールで起こる微細な乱流輸送過程のパラメータ化に起因する不確実性をできるだけ排除したデータが得られると期待されている。

近年の境界層過程のパラメタリゼーション開発は、国内においては中西幹郎氏と新野 宏氏(中西・新野 2010)を中心に活発に進められている。LESを基にして改良されたパラメタリゼーション(Mellor-Yamada Nakanishi-Niino (MYNN) モデル)の導入により、北海道周辺で発生した霧の時空間変動と風場が良く再現されている(第2図)。GCMで

活用する上では時間変動を始めとする境界層の基礎的な振る舞いの検証が進められた、より信頼性の高い手法を用いることが重要となる。このパラメタリゼーションはすでに国内のGCMへ組み込まれ、下層雲の再現性や対流活動への影響、温度成層のバイアス軽減への影響に関する調査が進められている(Noda *et al.* 2010, 2012, 2014a, b, 2015; Watanabe *et al.* 2010)。

国外の近年の活動をみると、例えば、ヨーロッパ中期予報センターでは渦拡散型とマスフラックス型の鉛直輸送を組み合わせたパラメタリゼーション(Köhler 2006; Köhler *et al.* 2011)、米国国立大気研究センターでは境界層の詳細な鉛直構造をモデル化したパラメタリゼーション(Bretherton and Park 2009; Park and Bretherton 2009)がそれぞれ開発され、GCMを用いた試験も進められている。

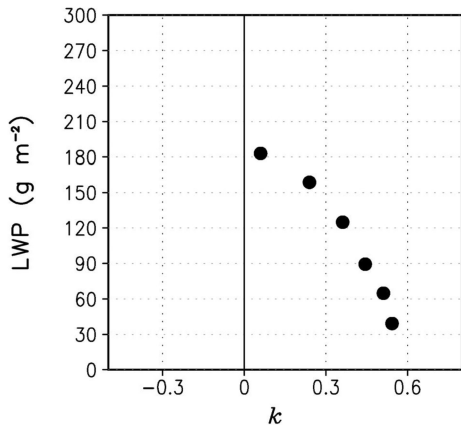


第2図 1999年8月5日に発生した霧の再現実験。(a)GMS可視画像,(b)MYNNレベル3モデルを用いた局地モデルの鉛直積算雲水量,(c)QuikSCATによる海上風,(d)局地モデルによる高度10mの水平風。(中西 2007)

LESによる詳細なデータを整理していると、その雲の振舞いにある種の規則性が見出されることがある。その一例として、下層雲の雲水量と雲頂を跨ぐ安定度の関係を第3図に示す。両者の間には明瞭な負相関があることから雲頂直上の乾燥空気の雲層への取り込みが下層雲の振舞いに強く影響を与えていることがわかる。類似の関係は形態の異なる下層雲の事例でも報告されている(例えば, Lock 2009; Sandu and Stevens 2011)。このような規則性が将来気候下の下層雲に対してどの程度適用可能であるかは議論の余地があるものの、パラメタリゼーションを開発する上で有用な情報を与えるものと期待できる。

3. 温暖化想定大気雲の応答

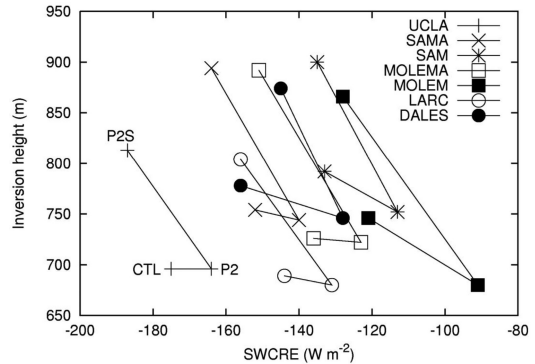
LESを活用したパラメタリゼーションの開発が行われる一方、近年では更に一歩踏み込み、温暖化想定



第3図 層積雲を伴う境界層のLESによる雲頂を跨ぐ成層の安定度 (横軸: $k = (C_p/L_p)(\Delta\theta_e/\Delta q_t)$) と積算雲水量 (縦軸) の関係。ここで、 θ_e , q_t , C_p , L_p はそれぞれ相当温位 (K), 全水混合比 (kg kg^{-1}), 比熱 ($1004.0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$), 気化熱 ($2.5 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$)。 (Noda *et al.* 2013)

大気下における下層雲の変化を調べる試みも進められている。この様なLESで得られた下層雲の応答に関する知識はGCMにおける下層雲の振舞いの妥当性を検討する上でも有益となろう。例えば, Blosssey *et al.* (2013) は複数のLESモデルを用いて亜熱帯から熱帯にかけて発生する3つの典型的な下層雲の形態についての温暖化応答実験を行っている。1つ目はカリフォルニア州沿岸付近の冷たい海面水温 (Sea surface temperature, SST) 域で発生する層積雲, 2つ目は沿岸から50 kmほど離れたやや冷たいSST域で発生し層積雲で覆われた積雲, そして, 3つ目はハワイ諸島南東付近のSSTの高い領域で発生する積雲である。

層積雲の変化をみると (第4図のCTLからP2Sへの変化), 概ねどのLESモデルでも雲短波放射が減少することを示している。このことは太陽入射光を宇宙へ跳ね返す効果が強まることで地球を冷やす作用を強める (負フィードバック) ことを意味する。更に彼らは2つ目の事例では中立, または正フィードバック, 3つ目の事例では正フィードバックであることを報告している (図略)。ここで興味深いのは下層雲の形態の違いによってそのフィードバックの符号が変化する点である。より現実的な応答を評価するためには下層雲をひとつくりにした調査では限界があり, その形態



第4図 各LESモデル (右上のラベル) で計算された層積雲を伴う境界層の逆転層高度 (縦軸) と短波雲放射 (横軸) の関係。CTL, P2S, P2はそれぞれ, 現在気候, 将来気候, 将来気候だが大規模下降流の変化を考慮しない場合についての実験結果。 (Blosssey *et al.* 2013)

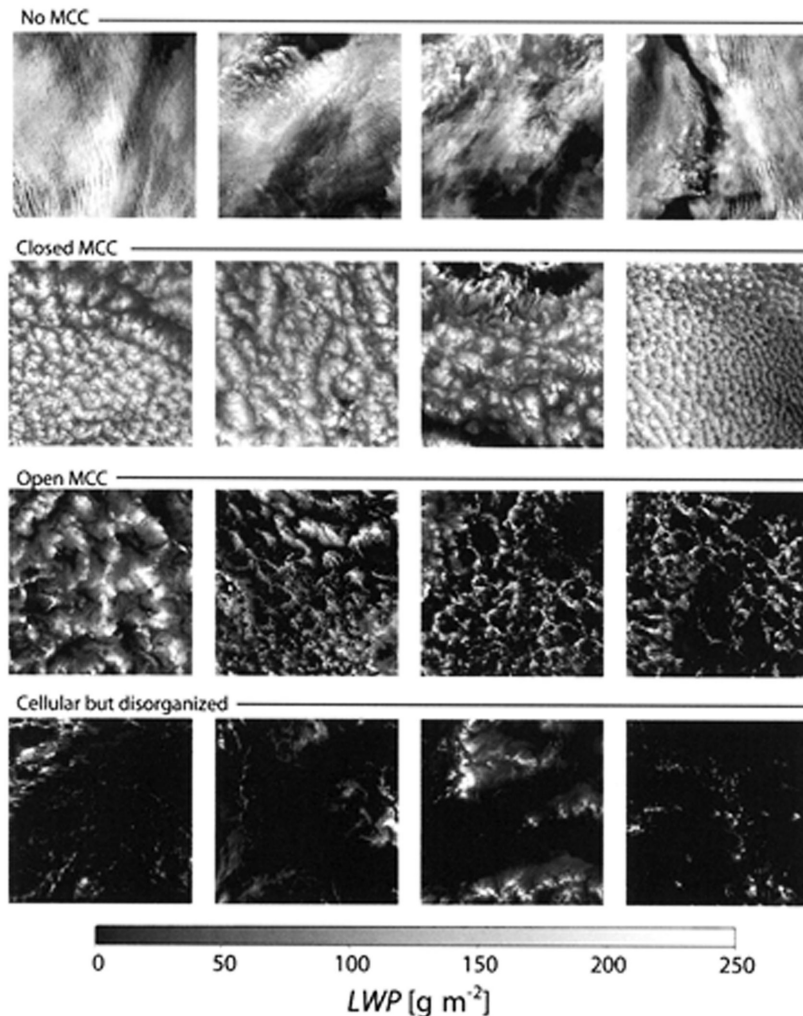
の違いにも注意を払う必要がある。

更に興味深い点は大規模下降流の影響である。大規模下降流の変化を考慮しない感度実験 (P2) では雲短波放射はむしろ増加 (下層雲は減少) している。このことはLESによる温暖化大気下での尤もらしい応答の評価には信頼できる大規模循環の変動量もまた必要ということになる。もともとLESモデルはGCMの下層雲の予測精度を改良する道具として活用されてきたのだが, 温暖化大気下の雲応答という困難な問題の解決にとっては, GCM側の精度向上もLES結果の信頼性の向上に大きく寄与することを示していると言える。

4. 下層雲の多様性

一口に下層雲と言ってもその実態は実に多様性に富んでいる。オープンセルやクロズドセルを始めとする境界層内部のメソスケール循環と結合した雲はその一例であろう (第5図)。1960年に気象観測衛星タイロスが打ち上げられて以降, 境界層で発生する多様なメソスケール循環の存在が広く知られる様になった。そして, その形成機構については今もなお活発な議論が続けられている。LESを活用した最近の研究では環境場のエアロゾル数濃度の違いがこの様な循環の形態の違いに結びついているという説が提案されている (例えば, Sandu *et al.* 2008)。

エアロゾルと雲の間接相互作用についてはこれまでも衛星観測や現地観測に基づいた解析結果が報告さ



第5図 下層雲の形態の多様性. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) で観測されたカリフォルニア沖とペルー沖の下層雲. (Wood and Hartmann 2006)

れている (Nakajima *et al.* 2001; Feingold *et al.* 2003). 更に近年の LES の研究結果を考慮すると, 現実大気では乱流や放射過程を介したより複雑な相互作用が働いている可能性が示唆されている. これらの結果は, 従来提起されてきた間接効果の理解を大きく変調する場合もある. その結果如何によっては現在の GCM で用いられるパラメタリゼーションの改訂が必要となるかもしれない.

以上で紹介した中緯度帯, 及び, 低緯度帯の下層雲だけでなく高緯度帯において寒気の吹きだし等に伴って発生する氷雲も下層雲の形態の1つとして重要な研

究対象である. しかし, その乱流-放射-雲微物理過程の相互作用の理解はほとんど進んでいない. その主な障害要因は氷雲の生成過程自体の理解が大きく不足していることにある (Fridlind *et al.* 2007; van Diedenhoven *et al.* 2009). LES にはその理解の向上と検証に重要な役割を担うことが期待されている.

5. おわりに

もともと微気象学より発展してきた大気境界層の LES 技法は, その有用性により, 現在では時空間スケールの大きく異なる気象学の研究者の間でも広く認知されるまでに浸透してきた. この浸透に重なる様に LES モデルに組み込まれる雲微物理過程の計算手法も当初用いられた簡素なバルク法から雲粒の成長をより詳細に計算するビン法へと大きく進化している. この飛躍的な進展によって, より複雑な相互作用を考慮した下層雲の形成過程の理解の向上に向けた研究へと

繋がっている. 今後の LES が果たす役割の増加には疑いの余地が無い.

その一方, 忘れてはならないのは LES といえどその計算結果はあくまで多くの仮定の上で得られた数値実験によるものであるという事実である. そのデータの信頼性は観測事実との整合性のチェックを経て初めて確認され得るものである. すなわち, 温暖化大気下での雲応答の推定という困難な課題においては, まずは対象としている下層雲の現実大気下における振舞いを LES が十分に再現していることが望まれる.

参 考 文 献

- Blossey, P. N., C. S. Bretherton, M. Zhang, A. Cheng, S. Endo, T. Heus, Y. Liu, A. P. Lock, S. R. de Roode and K.-M. Xu, 2013: Marine low cloud sensitivity to an idealized climate change: The CGILS LES inter-comparison. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **5**, 234-258.
- Bony, S. and J. L. Dufresne, 2005: Marine boundary layer clouds at the heart of tropical cloud feedback uncertainties in climate models. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L20806, doi:10.1029/2005GL023851.
- Bretherton, C. S. and S. Park, 2009: A new moist turbulence parameterization in the Community Atmosphere Model. *J. Climate*, **22**, 3422-3448.
- Feingold, G., W. L. Eberhard, D. E. Veron and M. Previdi, 2003: First measurements of the Twomey indirect effect using ground-based remote sensors. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1287, doi:10.1029/2002GL016633.
- Fridlind, A. M. *et al.*, 2007: Ice properties of single-layer stratocumulus during the Mixed-Phase Arctic Cloud Experiment: 2. Model results. *J. Geophys. Res.*, **112**, D24202, doi:10.1029/2007JD008646.
- Köhler, M., 2006: An integral approach to modelling PBL transports and clouds: EDMF at ECMWF. Proceedings of workshop on parametrization of clouds in large-scale models, 13-15 November 2006, ECMWF, Reading, UK, 93-101.
- Köhler, M., M. Ahlgrimm and A. Beljaars, 2011: Unified treatment of dry convective and stratocumulus-topped boundary layers in the ECMWF model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 43-57.
- Lock, A. P., 2009: Factors influencing cloud area at the capping inversion for shallow cumulus clouds. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**, 941-952.
- Nakajima, T., A. Higurashi, K. Kawamoto and J. E. Penner, 2001: A possible correlation between satellite-derived cloud and aerosol microphysical parameters. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 1171-1174.
- 中西幹郎, 2007: 大気境界層: モデル研究を中心に. *天気*, **54**, 115-118.
- 中西幹郎, 新野 宏, 2010: ラージ・エディ・シミュレーションに基づく改良 Mellor-Yamada Level 3 乱流クロージャーモデル (MYNN モデル) の開発と大気境界層の研究. *天気*, **57**, 877-888.
- 野田 暁, 中村晃三, 2008: 大気境界層雲と LES. *気象研究ノート*, (219), 89-116.
- Noda, A. T., K. Oouchi, M. Satoh, H. Tomita, S. Iga and Y. Tsushima, 2010: Importance of the subgrid-scale turbulent moist process: Cloud distribution in global cloud-resolving simulations. *Atmos. Res.*, **96**, 208-217.
- Noda, A. T., K. Oouchi, M. Satoh and H. Tomita, 2012: Quantitative assessment of diurnal variation of tropical convection simulated by a global nonhydrostatic model without cumulus parameterization. *J. Climate*, **25**, 5119-5134.
- Noda, A. T., K. Nakamura, T. Iwasaki and M. Satoh, 2014a: Responses of subtropical marine stratocumulus cloud to perturbed lower atmospheres. *SOLA*, **10**, 34-38.
- Noda, A. T., K. Nakamura, T. Iwasaki and M. Satoh, 2013: A numerical study of a stratocumulus-topped boundary layer: Relations of decaying clouds with a stability parameter across inversion. *J. Meteor. Soc. Japan*, **91**, 727-746.
- Noda, A. T., and M. Satoh, 2014c: Intermodel variances of subtropical stratocumulus environments simulated in CMIP5 models. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, doi: 10.1002/2014GL061812.
- Noda, A. T., M. Satoh, Y. Yamada, C. Kodama and T. Seiki, 2014b: Responses of tropical and subtropical high-cloud statistics to global warming. *J. Climate*, **27**, 7753-7768.
- Noda, A. T., M. Satoh, Y. Yamada, C. Kodama, T. Miyakawa, and T. Seiki, 2015: Cold and warm rain simulated using a global nonhydrostatic model without cumulus parameterization, and their responses to global warming. *J. Meteor. Soc. Japan*, doi:10.2151/jmsj.2015-010.
- Park, S. and C. S. Bretherton, 2009: The University of Washington shallow convection and moist turbulence schemes and their impact on climate simulations with the Community Atmosphere Model. *J. Climate*, **22**, 3449-3469.
- Sandu, I. and B. Stevens, 2011: On the factors modulating the stratocumulus to cumulus transitions. *J. Atmos. Sci.*, **68**, 1865-1881.
- Sandu, I., J.-L. Brenguier, O. Geoffroy, O. Thouron and V. Masson, 2008: Aerosol impacts on the diurnal cycle of marine stratocumulus. *J. Atmos. Sci.*, **65**, 2705-2718.
- Stevens, B., A. S. Ackerman, B. A. Albrecht, A. R. Brown, A. Chlond, J. Cuxart, P. G. Duynkerke, D. C. Lewellen, M. K. Macvean, R. A. J. Neggers, E. Sánchez, A. P. Siebesma and D. E. Stevens, 2001: Simulations of trade wind cumuli under a strong inversion. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 1870-1891.
- van Diedenhoven, B., A. M. Fridlind, A. S. Ackerman, E. W. Eloranta and G. M. McFarquhar, 2009: An evaluation of ice formation in large-eddy simulations of

- supercooled Arctic stratocumulus using ground-based lidar and cloud radar. *J. Geophys. Res.*, **114**, D10203, doi:10.1029/2008JD011198.
- Wang, H. and W. Su, 2013: Evaluating and understanding top of the atmosphere cloud radiative effects in Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fifth Assessment Report (AR5) Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) models using satellite observations. *J. Geophys. Res.*, **118**, 683-699.
- Watanabe, M. *et al.*, 2010: Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *J. Climate*, **23**, 6312-6335.
- Wood, R. and D. L. Hartmann, 2006: Spatial variability of liquid water path in marine low cloud: The importance of mesoscale cellular convection. *J. Climate*, **19**, 1748-1764.
- 吉森正和, 横畠徳太, 小倉知夫, 大石龍太, 河宮未知生, 塩竈秀夫, 對馬洋子, 小玉知央, 野田 暁, 千喜良稔, 竹村俊彦, 佐藤正樹, 阿部彩子, 渡部雅浩, 木本昌秀, 2012: 気候感度 Part 2: 不確実性の低減への努力. *天気*, **59**, 91-109.
-