

第9回非静力学モデルに関するワークショップの報告*

里村 雄彦*¹・國井
竹見 哲也*⁴・野田

勝*²・安永 数明*³
暁*⁵・重 尚 一*⁶

1. はじめに

2007年9月13~14日に第9回非静力学モデルに関するワークショップ(主催:日本気象学会非静力学数値モデル研究連絡会)が京都大学理学部で開催された。

本ワークショップは、高精度非静力学モデルを利用した気象および気候研究の推進・力学フレームの開発・物理過程パラメタリゼーションの開発に関する情報交換をする場として、最初は有志グループが、2001年の第3回からは気象学会の組織としての非静力学数値モデル研究連絡会が主催して毎年開催されている。これまでの開催状況については、前回のワークショップ報告(齊藤ほか 2007)に詳しいので、参照して欲しい。

今回は総計69名の参加と32件の発表があった。窮屈な日程であったため時間管理を厳しくしたが、20分の持ち時間を一杯に使って発表と活発な議論が行なわれ、現在の日本の非静力学モデル関連の基礎から応用まで最先端の研究を網羅したワークショップとなった。以下では、各セッションの座長によるセッション概要を紹介する。

なお、本ワークショップの講演要旨がホームページ

(http://www-clim.kugi.kyoto-u.ac.jp/clim/9thNHM_WS.html)に公開してあるので、詳しい発表内容はそちらを参照していただきたい。

2. セッション概要

2.1 全球非静力学モデル

彭・高橋(地球シミュレータセンター)は、陰陽グリッド系を用いた非静力学モデルであるMSSGを、水平格子間隔を20 km, 5 kmとして梅雨期の事例に適用した結果について紹介した。MSSGは変数配置にM-grid, 水物質の移流項に保存性を保障しつつ格子内の分布を近似して計算する保存型CIP法を実装している。結果としては、20 kmの実験では梅雨前線帯の降水分布が観測とよく一致したが、5 kmではあまりよく再現されなかった。物理過程の検証や初期値の精度向上が今後の課題である。

佐藤(東大気候システムセンター/地球環境フロンティア研究センター)ほかは、開発中の非静力学正20面体大気モデルNICAMの開発の現状について包括的な報告をした後、MTSAT-1RのTbbとNICAMのOLR(外向き長波放射)との対応付けによる積雲クラスターのサイズ解析について論じた。NICAMは小さいサイズの雲の表現が不十分であるが、海洋大陸域の雲サイズの日変化は観測によく対応していることを示した。

柳瀬(東京大学気候システム研究センター)ほかは、NICAMを用いた熱帯低気圧の再現実験について報告した。積雲対流パラメタリゼーションを用いずに、水平格子間隔14 kmで実験を行った。最盛期における中心部の眼や壁雲の構造を再現できた事例もあったが、一方で熱帯低気圧の発生数が過小評価されるという問題もあった。積雲対流パラメタリゼーションの使用、モデルの高解像度化などが検討課題である。

* Report on the 9th Workshop on Non-hydrostatic Modeling.

*¹ Takehiko SATOMURA, 京都大学大学院理学研究科.

*² Masaru KUNII, 気象研究所台風研究部.

*³ Kazuaki YASUNAGA, 地球環境観測研究センター.

*⁴ Tetsuya TAKEMI, 京都大学防災研究所.

*⁵ Akira T. NODA, 地球環境フロンティア研究センター.

*⁶ Shoichi SHIGE, 大阪府立大学大学院工学研究科.

三浦（地球環境フロンティア研究センター）ほかは、NICAMを用いたマッデンジュリアン振動(MJO)の再現実験について報告を行った。NCEPの解析値を初期値にした水平格子間隔7kmで実験を行い、インド洋からSPCZにかけてのMJOに伴う積雲活動の活発域の東進を再現した。この理由として、大規模な現象がMJOの再現には支配的であり、それがモデルで表現できたためと結論付けた。

富田（地球環境フロンティア研究センター）ほかは、開発中のNICAMにおける雲微物理スキームNSW6(NICAM Single-moment Water 6)について報告を行った。NSW6はLinタイプのスキームを簡略化したもので、計算効率が良い。スコールラインのテストケースによる検証実験では、WRF(Skamarock *et al.* 2005)で採用されているLin(Lin *et al.* 1983)タイプのスキームと同等のパフォーマンスを示した。格子間隔によるチューニングが今後の課題である。

三井（東京大学気候システム研究センター）ほかは、NICAMにエアロゾルモデルSPRINTARSを組み込み、エアロゾルの雲に及ぼす効果について報告した。今後は、放射強制力への影響が強いと見られる雲量を評価するために、まずは定義を見直し、格子間隔の問題やエアロゾルの影響を詰めていく予定である。

野田（地球環境フロンティア研究センター）ほかは、NICAMの下層雲の再現性を検証するため、水平分解能14kmの実験を行った。乱流拡散係数の計算にMellor and Yamada (1982)の部分凝結法とNakanishi and Niino (2004)による乱流長さスケールを導入することにより、亜熱帯域における下層雲の空間分布が改善されたことを示した。今後は、長期的な再現性についての検証及びモデルの改良を行っていくとのことであった。(國井 勝)

2.2 気象庁モデル開発と検証

本セッションでは、気象庁の非静力学モデル(JMANHM)を用いた予報やデータ同化に関係した9件の発表があった。

國井（気象研究所）ほかは、WWRP北京2008予報実証実験/研究開発プロジェクトの2007年夏期に行われた予備実験の概要について紹介した。WWRP北京2008予報実証実験/研究開発プロジェクトとは、世界気象機関天気研究計画(WMO WWRP)の下で実施されている短期予報に関する国際研究プロジェクトで

あり、2008年の北京オリンピックに合わせて各国気象機関が短期予報に関する国際比較実験を行って技術情報を共有することが目的である。気象庁は北京周辺の36時間までのメソスケールアンサンブル予報を行って予報結果の比較やアンサンブル技術の情報交換を行うプロジェクト(RDP)に参加している。来年度に向けた準備として、北京域においてメソ解析を実行できるような環境など、実験環境の構築はほぼ終了した。

瀬古（気象研究所）ほかからは連続した2件の講演があり、WWRP北京2008予報実証実験/研究開発プロジェクトの予備実験として2007年夏期に行われた予報結果と、開発システムを日本域に適用した場合の結果について報告された。WWRP北京2008予報実証実験/研究開発プロジェクトに参加している各機関のモデルによる降水や地上気温のパターン比較を行い、中国気象局(CMA)で降水パターンが広く拡がってしまうことや、JMANHMで地上の最高気温が低めに予報されることが確認された。このプロジェクトの目的は、あくまでも研究者間の情報交換であり、モデルの優劣を競うコンテストではないとのことであったが、今回の予備実験での各機関のモデルによる降水予報の大きな違いを考えると、今年の北京オリンピック中のプロジェクト担当者の気苦労は多そうだ。また日本域の適用に関しては、台風の日本列島通過事例に対して、アンサンブル予報による予報精度向上が確認できた。

三浦（気象庁）は、2007年5月に更新した新メソ数値予報モデル(MSM)の予報精度の検証と、更新前の旧MSM、領域モデル(RSM)との精度比較を、2006年7月から2007年6月の1年間を対象に行った。降水に関しては、新MSMは旧MSMよりも改善傾向を示し、RSMよりも精度が良かった。新MSMの冬期における強雨の予報頻度は山岳で過剰、日本海側平野部で過小評価であった。地上の気象要素に関しても、新MSMは夜間を中心に改善し、ゾンデを用いた高層の気象要素に関しては、旧MSMやRSMと同程度であった。新MSMでは、予報時間が33時間に延長されているが、予報後半での極端な予報精度劣化は見られなかった。

中村（気象研究所）ほかは、2006年の夏期、関東領域を対象にして、JMANHMの格子間隔を5km、1km、250mと変えた比較実験の結果を示した。降水強度別頻度分布に関しては、250m、1kmで似たような分布を示すが、5kmでは、強雨の頻度が減少し

た。境界層に関しては、分解可能な乱流スケールの違いが原因で、水蒸気の鉛直輸送に大きな差が現れていた。雲の生成に関しては、1 km 格子間隔の方が250 m 格子間隔よりも雲水量が多くなった。幾つかの検証では、格子間隔による系統的な結果が出なかったが、5 km 格子間隔だけ Kain-Fritsch の対流パラメタリゼーション (KF) スキームを使用していることが一因かもしれない。

竹之内 (気象庁) ほかは、JMANHM をベースとした水平格子間隔 2 km 程度の高分解能局地モデル (LFM) の開発に関する発表を行った。地上のアメダスの風速や気温の観測値も同化している点が、現業の MSM との大きな違いとして挙げられた。雨の予報精度に関しては、強雨の精度が上がった一方で、弱い雨の表現が現業 MSM よりも劣っていた。気温に関しては、地上気温の同化により改善が見られたが、風速に関しては同化を行っているにもかかわらず現業 MSM と差が見られなかった。実況にない格子スケールの降水を抑制するために、KF スキームを使用していることに個人的には驚いた。これは、水平格子間隔 2 km でも積雲対流の表現に不十分であることを意味するのか、雲微物理や乱流といった物理過程のパラメタリゼーションの改善の必要性を意味するのか、今後の研究が待たれる。

三好 (気象庁) からは、アンサンブル・カルマンフィルタ開発の最近の進展報告があった。衛星による放射輝度観測データの同化に関して、新しいバイアス補正手法の開発により、全球モデルの予報スコアの改善が示された。ここで紹介された放射輝度観測データの同化手法は、JMANHM をはじめとした様々な非静力学モデルにも低コストで応用可能であり、今後は、自前の非静力学モデルに実際の衛星観測データを同化しながら、様々な現象のメカニズムを解明するような研究も進んでいくと考えられる。

川畑 (気象研究所) ほかは、JMANHM をベースにした 4 次元変分法データ同化システムの開発に関して、ドップラーレーダによる動径風、GPS 可降水量、地上風、地上気温、レーダ反射強度の同化実験結果について発表した。首都圏豪雨をもたらした線状降水帯の再現にほぼ成功し、その成功は今回の設定では、レーダ反射強度の同化が最も重要な役割を果たしていた。今回は降水パターンの再現性に関する発表であったが、再現性向上により予報がどの程度向上するのか、個人的には非常に気になるところである。

成田 (気象庁) は、水平格子間隔 5 km で運用している現業の MSM による降水予測の精度の向上を目指した KF スキームの改良に関する発表を行った。これまで、KF スキームの導入により弱い雨の過小、強雨の過剰評価を改善できるが、梅雨期に地形に沿った不自然な降水予測や格子スケールの対流の発生という問題点が指摘されてきた。今回、上昇流の水平平滑化、対流によって消費される CAPE の割合を調整、上昇流から除去される凝結物の変換方法の変更、上昇流の発生の判定方法の変更といった変更を加えることで、不自然な降水の抑制がある程度出来ることが示された。(安永教明)

2.3 雲と降水

本セッションでは、前半に雲・降水の力学・微物理過程に関する講演が 4 件、後半に雲と地表面との相互作用に関する講演が 3 件あった。

加藤・林 (気象研究所) は、九州・四国地方の梅雨期を含む 5-7 月の積乱雲の発達高度を雲解像シミュレーションによって求め、LNB による雲頂高度の診断の有効性について議論し、傾圧性が強い場合の診断に工夫が必要であると指摘した。また総降水量への発達高度別の寄与率は、高度 5 km 未満の場合の降水が最も高くなることを示した。井口 (東京大学) からは、JMANHM にヘブライ大学雲モデルのビン法雲微物理モデルを組み込み、船舶搭載レーダーライダーによる海上の観測値によりモデル計算結果の検証を行った。層雲が列状に並ぶ場合で検証した結果、モデルでは雲が塊状に形成される傾向にあることを示した。雲物理過程だけでなく総観場の再現性にも課題があるようである。安永 (地球環境観測研究センター) からは、著者らが Melting Layer Cloud と名付けた熱帯海上での融解層高度付近の雲層の生成過程を 2 次元で理想化した条件での感度実験によって調べた。その結果、中層の雲層の形成には融解過程が最も重要であり、安定層の影響は第一義的ではないと結論した。重 (大阪府立大) からは、TRMM 降雨レーダによる降水の鉛直構造の観測値から潜熱加熱プロファイルを推定するアルゴリズムを 3 次元モデル計算 (水平格子間隔 2 km) による参照テーブルを用いて適用し、2 次元モデルによる解析との比較を行った。3 次元計算の方が加熱ピークの高度が高く見積られる傾向にあり、2 次元解析の場合の方がより観測に近い結果が得られ、3 次元計算では水平格子間隔が重要であると指摘した。

セッション後半では、まず高橋（地球環境フロンティア研究センター）がインドシナ半島での降水の日変化を調べた結果について報告した。タイ内陸北東部の夜間の降水ピークに注目し、TRMM 降雨レーダ観測を用いてモデル計算の妥当性を確認した上で、その降水ピークの物理過程を調べ、下層の南風が夜間に強化されることで収束が強まり降水が生じることを示した。石川（京都大学）らは、雲解像モデルと海洋表層モデルを結合した高分解能モデルを用い、熱帯積雲活動の海面水温に対する依存性を調べた。水温29°C以上の場合に積雲活動が活発化することを示し、この分岐は淡水フラックス（降水）と海面熱フラックスとの大小から決まる海洋表層の熱容量のバランスによることを明らかにした。川瀬（地球環境フロンティア研究センター）らは、中国内陸部半乾燥地域における雲の日変化について調べ、灌漑の影響について議論した。灌漑の効果は、土壌水分を変化させる感度実験により評価した。土壌が湿潤なほど上空には雲が出現せず周囲に雲が発達する様子が再現された。灌漑地域と周囲の地形との間で形成される局地循環により灌漑地上空では下降流となるため雲の形成が抑制されることを示した。（竹見哲也）

2.4 境界層・乱流・局地現象

岩崎（東北大学）らは清川だしのドップラーライダーを始めとする野外観測と高分解能領域モデルとの比較解析から、大気下層に存在する臨界層がだし風の強化に寄与している可能性を示した。また、仙台湾から侵入する海風前線の観測例などからドップラーライダーを用いた大気境界層研究への期待を示すとともに今後の数値実験との連携について述べた。青柳と清野（気象研究所）はJMANHMに導入する単層都市キャノピーモデルの開発について報告した。熱伝導方程式に基づく物体の温度を予測する手法を用いることで現実的なパラメータを導入したビルの表面温度の予報可能性を示した。また、物体による日陰域の時間変動を考慮した結果を示した。飯塚と近藤（産業技術総合研究所）は植生キャノピー乱流のLESを試みるためにRANSで使用される渦粘性モデルをキャノピー層へ応用したハイブリッド型モデルを提案した。そしてRANSモデルとLESモデルの切り替え位置付近の扱い等、現実的なLESモデルの開発に関わる展開について論じた。北村（気象研究所）はGABLSで提案されている安定境界層の環境場を用いてLESの

パラメタリゼーションスキーム（Smagorinsky model, Deardorff model, Two-part model, Dynamic Smagorinsky model）の試験を試みた。そしてモデル間の振舞いの違いについて論じた。余（東北大学）は成層風洞実験設定を基に、5 mmの微細計算格子を用いた建物模型解像LESを行った。そして物体周辺の熱構造について比較解析を行うことでLESモデルの精度検証を試みた。山崎と里村（京都大学）は水平格子間隔数100 mの超高解像度大気モデルにおける急峻な地形を表現することに適しているshaved-cell法を用いたz座標系2次元非静力学ドライモデルの開発を行った。また、CFL条件による時間ステップの制約を緩和させるために結合セルを用いた方法を提案した。山岳波比較実験の追試結果からz*座標系で発生する計算ノイズを有効に軽減できることを示した。

当セッションでは、基礎から応用に亘る数値モデリング技術開発の紹介とともに、野外実験、室内実験との効率的な連携を図る試みも報告されるなど、より精度の高い数値モデル開発に向けて大きく前進しているという印象を受けた。（野田 暁）

2.5 物質輸送

竹見（京大防災研）は、中国ゴビ砂漠南部で観測された晴天時の日変化の事例（Yasui *et al.* 2005）を対象とした乾燥・湿潤対流および物質輸送の高解像度シミュレーションについて発表した。晴天時の混合層の発達のは日の出前の安定度の構造に大きく影響され、前日の混合層の残余層が接地逆転層上部に存在する場合、圏界面まで達する積乱雲が発達し、ダストの鉛直輸送が活発に起こることを示した。清野（気象研究所）ほかは、タリム盆地における黄砂輸送と浅間山噴火時における降灰を対象としたJMANHMによる大気移流拡散シミュレーションについて発表した。前者では、総観場の影響下で地形に結びついて発達した複数の異なる風系が長期間のダスト浮遊の要因となっていることが示され、後者では、降灰域の特徴は概ね再現できているものの、降灰量の予測値が観測値に比べて少ないことが示された。庭野（地球環境フロンティア研究センター）ほかは、WRFと“on-line”を結合したWRF/Chemを用いた全球・領域化学輸送モデル（Takigawa *et al.* 2007）の評価について発表した。差分吸収型ライダー（Nakazato *et al.* 2007）の対流圏オゾン観測データとの比較から、モデルは観測結果と概ね一致しているものの、1.5 km以下でモ

デルが過大評価, 1.5 km 以上で過小評価しており, 地表オゾンの増加・減少が遅れる傾向が判明した.

(重 尚一)

3. おわりに

今回は発表32件となり, 初日の朝から2日目の夕方まで非常に窮屈な日程となった. これ以上発表件数が増えると, これまでの2日間1会場という方式のままでは十分な発表質疑時間を確保できなくなりそうである. 日程を延ばすための対策が必要になりそうだ. また, 窮屈な日程のため, 今回は最後に総合討論の時間を充分確保できなかった. しかし, 短い時間だったが今後の本ワークショップの運営について話し合い, 隔年でも良いから国際ワークショップにする可能性を探ることとなった. また, 次回は名古屋で行なう予定になっていることも紹介された.

本ワークショップが始まった世紀の変わり目の頃は, 世界の数値予報センターにおいて非静力学モデルを現業予報に使用するための模索が行なわれていた時であり, その後のモデル界にインパクトを与えたNICAMも基礎骨格(格子系や力学フレーム)開発の途についたばかりの時である. 第9回となった今回は全球非静力学モデルと気象庁非静力学モデルの開発・検証とで丸1日のセッションが構成されるなど, 当時開発中であったモデルを用いた成果が次々と発表され, 新モデル開発の1サイクルが終わった感がある. しかし, それは即ち次世代・次々世代モデルの議論を始める時でもある. 今回提案された国際ワークショップ開催の実現なども含め, 今後のワークショップでの新たな議論の展開に期待したい. (里村雄彦)

略語一覧

CFL : Courant-Friedrichs-Lewy

CIP : Constrained Interpolation Profile

GABLS : GEWEX Atmospheric Boundary Layer Study

LES : Large Eddy Simulation

LNB : Level of Neutral Buoyancy

NCEP : National Centers for Environmental Prediction

RANS : Reynolds-Averaged Navier-Stokes

SPCZ : Southern Pacific Convergence Zone

TRMM : Tropical Rainfall Measuring Mission

参考文献

- Lin, Y. L., R. D. Farley and H. D. Orville, 1983 : Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Climate Appl. Meteor.*, **22**, 1065-1092.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1982 : Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, 851-875.
- Nakanishi, M. and H. Niino, 2004 : An improved Mellor-Yamada level 3 model with condensation physics : Its design and verification. *Bound.-Layer Meteor.*, **112**, 1-31.
- Nakazato, M., T. Nagai, T. Sakai and Y. Hirose, 2007 : Tropospheric ozone differential-absorption lidar using stimulated Raman scattering in carbon dioxide. *Applied Optics*, **46**, 2269-2279.
- 斉藤和雄, 岩崎俊樹, 佐藤正樹, 本田有機, 加藤輝之, 栗原和夫, 余 偉明, 新野 宏, 2007 : 第8回非静力学モデルに関するワークショップの報告. *天気*, **54**, 255-260.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang and J. G. Powers, 2005 : A description of the Advanced Research WRF version 2. NCAR Technical Note, NCAR, (468), 88pp.
- Takigawa, M., M. Niwano, H. Akimoto and M. Takahashi, 2007 : Development of a one-way nested global-regional air quality forecasting model. *SOLA*, **3**, 81-84, doi : 10.2151/sola.2007-021.
- Yasui, M., J. Zhou, L. Liu, T. Itabe, K. Mizutani and T. Aoki, 2005 : Vertical profiles of Aeolian dust in a desert atmosphere observed using lidar in Shapotou, China. *J. Meteor. Soc. Japan*, **83A**, 149-171.