

第21回非静力学モデルに関するワークショップ開催報告*

万田 敦昌^{*1}・西本 秀祐^{*2}・雨宮 新^{*3}
川畑 拓矢^{*4}・伊藤 純至^{*5}・樫村 博基^{*6}

1. はじめに

第21回目の非静力学モデルに関するワークショップが、2019年11月21-22日に三重大学三翠ホールで行われた。このワークショップは、高精度の非静力学モデルの開発者と利用者の幅広い情報交換の場として2000年から始まり、国内の各地で開催されてきた。今回は三重が開催地になり、日本気象学会非静力学数値モデル研究連絡会、三重大学大学院生物資源学研究所がそれぞれ主催者、共催者となり、気象庁による後援のもとで行われた。2日間の日程において23件の口頭発表があった。このワークショップではこれまでと同様に、力学フレーム、物理過程とそのパラメータ化、データ同化、現象の解析、局地気候モデルなど、LESから全球、基礎から応用に至るまで、非静力学モデルについて幅広く議論することを目標とし、近年行われているメソアンサンブル予報に関する研究も対象に含めて情報交換を行った。

以下では本ワークショップで設けられた5つのセッションについて、各セッションの講演と質疑の内容を述べる。なお、本ワークショップの講演要旨はホームページ (<https://www.cc.mie-u.ac.jp/~nhm2019/>) に掲載されている。興味のある方はこちらも適宜参照い

ただきたい。

(万田敦昌)

2. セッションの概要

2.1 セッション1

このセッションでは5題の発表があった。

齊藤和雄(東大)・松信 匠(筑波大)は台風が日本の南海上にある時に現れる北向きの非地衡風の成因について、2009年台風第18号の接近時の高層観測や客観解析を示し、水平解像度10kmの気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)で非地衡風が再現されること、その成因として水平風加速度ベクトルの左向きに生じる非地衡風が考えられることを示した。この結果は、2013年に行われた第15回非静力学モデルに関するワークショップ(川島ほか 2014)で齊藤から一度報告されているが、他の要因も含めた解析は今後の課題であった。今回の発表では、SOLAに発表した論文(Saito 2019)での降水過程や地形の影響についての感度実験の結果や台風上層風の非軸対象構造についても議論するとともに、PREと呼ばれる台風に先立つ降水への影響についても言及した。

澤田 謙(気象研)は、予報初期の降水量が過剰(過少)となるスピンドアウン(スピンアップ)問題の解決に向けて、気象庁数値予報開発の現業メソ数値予報システムに基づく実験環境の同化システム(JNoVA)に過飽和制約を組み込み、特定の事例において解析誤差の減少や降水表現の若干の改善がみられることを示した。

西本秀祐(気象庁)は、気象庁の現業メソモデル(MSM)の境界層過程(MYNN3)で発生する数値振動について原因を調べ、時間離散化の見直しを行うことで精度に影響を与えず計算を安定化させる改良を

* Report on the 21st Workshop on Non-hydrostatic numerical modeling

^{*1} (連絡責任著者) Atsuyoshi MANDA, 三重大学生物資源学研究所。

^{*2} Shusuke NISHIMOTO, 気象庁。

^{*3} Arata AMEMIYA, 理化学研究所。

^{*4} Takuya KAWABATA, 気象研究所。

^{*5} Junshi ITO, 東京大学大気海洋研究所。

^{*6} Hiroki KASHIMURA, 神戸大学大学院理学研究科。

© 2021 日本気象学会

行った。

鈴木健斗（東北大）ほかは、関東平野に発生する沿岸前線にみられる MSM（5 km メッシュ）の系統的誤差について JMA-NHM を用いた感度実験で原因を調べた。その結果、沿岸前線の誤差は主に数値モデルの山岳が実際より低いことに起因すること、解像度を 1 km にすることで、前線の誤差距離は 4 割程度減少し、モデル地形に Envelope Orography を導入すると、誤差はほぼ解消することを示した。

小原涼太（東北大）ほかは、平成30年7月豪雨において暖気の上昇が活発であった等温位面を同定し、降水の蒸発に関する感度実験を JMA-NHM を用いて行うことで蒸発による寒気の生成が上昇流の活発な温位面の相対的な南方向への変位に寄与したことを示した。

（西本秀祐）

2.2 セッション 2

続いてのセッションでは、データ同化に関する内容を中心とした講演が 5 件行われた。

三好建正（理研）ほかは局所粒子フィルタ（LPF）についての最新の研究の紹介を行った。解析値を求める際の線形結合の重みを粗い格子で計算し内挿する手法と、確率分布を Gaussian Mixture で表現することに相当する、粒子フィルタとアンサンブル変換カルマンフィルタの発想を組み合わせた新たな同化手法が紹介された。後者については数式上の構造が局所アンサンブル変換カルマンフィルタ（LETKF）に類似しており実装が容易という特長も注目に値する。SPEEDY モデルを用いた実験でそれぞれの手法の比較を行い、LETKF に比べて最適な局所化長が異なることなどが議論された。

山浦 剛（理研）ほかは、浮動小数点の打ち切り誤差の時間発展に関しての理論的な解析を、浅水系の理想的な状況を題材にして行った。これはモデルが高解像度化するにつれ相対的に大きくなる打ち切り誤差の影響を評価する必要性が背景にある。浅水系の地衡風平衡と順圧不安定の状態それぞれについて理論的に調べ、前者は外部強制によりランダムウォーク的に増大、後者は不安定の成長に対応した増大のしかたをすると結論付けた。これらの理論的解析は数値実験で確かめられた。

幾田泰醇（気象庁）は、気象庁メソ解析における 4D-Var の新たな手法の導入のインパクトについて報告した。4D-Var では評価関数とその勾配の計算に摂動の時間発展について線形化した随伴モデルを用いるが、

最小値探索の繰り返し処理において、新たな手法では途中で更新された基本場を用いて随伴モデルも更新し以降の探索に用いる。これにより同化時間幅の間の非線形過程の影響を考慮することができる。実観測を用いたデータ同化実験により、特にレーダや降水観測といった非線形的な降水系の成長に左右される観測の同化に関して大きなインパクトが示された。

寺崎康児（理研）ほかは、空間方向に相関をもつ観測誤差の考慮がデータ同化に及ぼすインパクトを検証した。NICAM-LETKF での従来の衛星全球降水マップ（GSMaP）の同化では考慮されていなかったが、観測データは水平方向に数百 km のスケールで相関をもつ。観測誤差共分散行列の非対角成分を陽に考慮するよう改変した NICAM-LETKF を用いて同化実験を行い、特に対流圏下層の気温や水蒸気量に最大 6 % の改善を見出した。

雨宮 新（理研）ほかは、領域気象モデル SCALE へのフェーズドアレイ気象レーダの同化に用いる観測演算子の計算について述べ、その改善の予報へのインパクトを示した。レーダ反射強度とモデルの降水物質の量を関係づける観測演算子は、電波の散乱を計算するレーダシミュレータの結果の近似的表式として得られる。従来の観測演算子に変えて、SCALE の雲微物理スキームの粒径分布のパラメータと整合的な設定で作られた観測演算子を用いることで、以前から知られていた延長予報における積雲の発達の大きなバイアスが大幅に改善されることが報告された。

（雨宮 新）

2.3 セッション 3

本セッションではメソスケールデータ同化に関する 4 件の講演があった。

瀬古 弘（気象研）ほかは気象庁メソデータ同化実験システム（メソ NAPEX）を用いて、まず航空機による高頻度観測データ（モード S データ）のインパクトを示した。モード S データの下層における気温バイアスなど品質調査を実施した後、積乱雲やシアラインなどの形成過程が同化によって改善されたことを報告した。次に東シナ海に展開した船舶搭載 GNSS 観測装置（8 隻に搭載）による水蒸気データ同化による線状降水帯の予測改善を示した。

川畑拓矢（気象研）ほかは雲解像粒子フィルタ（NHM-RPF）に組み込まれている観測誤差の動的推定 ARE について講演した。ARE はベイズ推定による観測誤差推定手法であり、同化のタイミングで毎回観測

誤差が更新される。これによってNHM-RPFが安定して動作し、かつ精度が向上することが示された。次に、積乱雲の発生・発達に伴う誤差の増大や、仮想的に作成された観測値に含まれる大きな誤差など適切な推定に成功したことを報告した。

藤田 匡 (気象研) ほかはドップラー速度観測データについて、誤差相関を考慮した同化法の提案を行った。札幌レーダーについてビーム方向、方位角方向、仰角方向それぞれの空間誤差相関を調べ、さらに時間方向の相関構造を推定した。簡単モデルを用いた実験では、誤差相関を考慮した場合にドップラー速度の細かい空間構造が再現できることを示した。さらにこのような細かい構造を同化ウィンドウの初期時刻において表現するために、アンサンブルデータを用いたハイブリッド4次元変分法による実験を行った。そしてハイブリッド化したときによりメリットが大きいことを報告した。

最後にP.-Y. Wu (京大) ほかは、解像度3 kmのWLRAS (Tsai *et al.* 2014) を用いた小アンサンブル(40メンバー)と大アンサンブル(256メンバー)実験を実施して、これらを比較することで対流スケールのサンプリング誤差について議論した。評価に用いたデータは反射強度(Zh)とドップラー速度(Vr)であり、それぞれ水物質、運動場との相関が良く、サンプリング誤差が小さかった。ただし、運動場とZh、あるいは水物質とVrの間ではサンプリング誤差が大きかった。さらにドップラーレーダーではビームに直交する風速は測定できないが、このような領域においてサンプリング誤差が大きくなることを報告した。

瀬古の講演はいずれも新規観測データ、システムによる豪雨予測の改善を示しており、講演者の開拓精神に敬意を表したい。また藤田から報告された時間方向の誤差相関を考慮する実観測データ同化はこれまでに例がなく、進展が望まれる。筆者(川畑)による粒子フィルタは対流スケール同化に必須の非ガウス性を陽に取り扱い、従来手法では扱えないケースに道を開くものである。Wuらの研究はアンサンブル同化で重要でありながら余り取り組まれていない変数局所化の必要性を示唆するものであり、今後の深化を期待したい。以上のように本セッションにおいては先駆的研究報告がなされ、大変有意義であった。

(川畑拓矢)

2.4 セッション4

新野 宏 (東大) ほかは1992年12月8日に茨城県千

代田町でQLCS(準線状の対流系)に伴って生じた竜巻の事例を、JRA-55からの4重ネスト(最内側の水平解像度は50m)した数値モデルにより再現した。再現された竜巻の循環の起源を後方流跡線解析で調べたところ、主に環境場の水平シアに伴う循環と摩擦による生成からなっており、傾圧的な生成の寄与は小さいことがわかった。

伊藤純至(東大)ほかは瞬時的な接地境界層フラックスをパラメタライズする手法として、深層学習モデルの利用を提案した。風洞実験において測定した流速を学習した深層学習モデルによる、瞬時的なフラックスの高精度の診断が可能であることを示した。

佐藤陽祐(北大)ほかは大気モデルに雲の水物質が持つ電荷密度とそれによって形成される電場の時間発展を計算する雷モデルを実装し、発雷過程を予報するSCALE-LTを紹介した。台風の場合、軸対称化前には広範囲にわたって発雷がみられるが、軸対称化後は壁雲においてのみ発雷が生じる様子を捉えた。

本田 匠(理研)ほかは前述の発雷に関わる過程が導入されたSCALE-LTを活用し、発雷の仮想的な観測のアンサンブルデータ同化によるOSSE(観測システムシミュレーション実験)を理想的なスーパーセルについて行った。発雷地点の2次元的な観測と比較し、3次元的な発雷地点の観測の方がデータ同化によってより多くの情報を得られる可能性を示した。

(伊藤純至)

2.5 セッション5

最後のセッションでは、全球モデルを用いた研究が3件、領域モデルを用いた研究が2件報告された。

佐藤正樹(東大)ほかは全球雲解像モデル比較実験DYAMOND (Stevens *et al.* 2019)とその初期成果の一部を紹介した。DYAMONDには世界9機関のモデルが参加しており、各モデルが2016年8月1日の同一の初期値から40日間のシミュレーションを行った結果が、ドイツ気候計算センター(DKRZ)に集められ、公開されている。参加した全てのモデルで、衛星画像と見間違えるほどの雲が再現されており、熱帯収束帯の平均降水量もGSMaPと同程度であった。ただし、雲の高度分布や構成、組織化の様相にはモデル間で大きな差があった。

榎村博基(神戸大)ほかは全球非静力学モデルの数値計算で起こりうる顕著な時間刻み幅依存性について報告した。モデル内で強制(物理)過程と力学過程が分離されており、強制過程において予報変数が更新さ

れる場合、強制的規模や時間刻み幅に応じた人工的な音波が生じる。加えて、全球モデルで現実的な時間刻み幅では、音波の鉛直伝播は正しく解けないため、この音波は、時間刻み幅に依存した人工的な鉛直流のバイアスとなり、特に QBO などの鉛直流に敏感な現象に影響を与える。強制による変化率を力学過程で加えることで、このバイアスは回避できることが示されたが、一方で複雑な物理や調節過程を含むモデルではこのような回避策はとれないため、今後の課題として残された。

W. Roh (東大) ほかは全球モデル NICAM で表現される南極海上の混相雲の再現性を評価した。Yoshida *et al.* (2010) が CALIPSO データから雲粒の種類の割合を評価した手法を応用することで、モデル内の混相雲を観測結果と詳細に比較することが可能となること示された。また、6種の雲粒をシングルモーメントで計算するスキームとダブルモーメントで計算するスキームでは、後者の方が水雲の割合が高くなり、より観測と整合的であることが示された。

奥川 椋介 (富山大) ほかは領域モデル SCALE-RM を用いて、スマトラ島西岸の沿岸降水帯の再現性について調べた。標準的な設定で2015年11月22日から15日間の計算をしたところ、GSMaP で見られるようなスマトラ島西側沿岸域での降水強度の極大は再現されなかった。この要因を探るために雲粒の粒径分布や落下速度、地表面フラックスに関する感度実験が実施された。その結果、より高温の SST を用い、雲水の落下速度を低下させた場合に、沿岸降水帯の再現性が最も向上した。すなわち、SST と上層の雲水が、スマトラ島西岸の沿岸降水帯を形成する上で重要であることが示唆された。

万田 敦昌 (三重大) は領域モデル WRF を用いて、近年のメソ対流系による集中豪雨が地球温暖化の影響をどの程度受けているのかを研究した。平成29年7月九州北部豪雨を典型例として、この事例の再現実験を実施した。その上で、様々な海面水温と大気の観測・再解析データセットから、1982年から2017年までの海面水温と気温の線形トレンドを求め、このトレンドを差し引いた初期値・境界値による計算が感度実験として行われた。結果、海面水温トレンドの大きさが0.5°C程度の場合には、雨量への影響は1%程度だが、0.75°C程度の場合にはクラウジウス・クラペイロン則を上回る15%程度の影響を与えることが示された。また、環境場の気温の鉛直プロファイルに不確実性が

大きい場合においても適切な水温分布を与えることにより温暖化の影響が検出できる可能性が示された。

(樫村博基)

3. おわりに

初の三重大での開催となった今回のワークショップを終えて、極端気象をはじめとするメソスケール現象のメカニズムを探求するためのツールとしての非静力学モデルが成熟の域に達したことを実感するとともに、先進的データ同化や全球モデルへの適用など、非静力学モデルの応用範囲が急速に広がっていることが強く感じられた。今後このような傾向はますます強まると思われるとともに、多彩な関連分野の情報交換の場としての本ワークショップの存在意義はますます高まっていくであろう。なお、今回は京都で国際ワークショップを行う予定である。

最後になりましたが、運営に協力いただいた、非静力学数値モデル研究連絡会、気象庁、三重大の関係各位に深く御礼申し上げます。

(万田敦昌)

略語一覧

4D-Var : 4 Dimensional Variational Data Assimilation

ARE : Adaptive R Estimator

CALIPSO : Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations

DKRZ : Deutsches KlimaRechenZentrum

DYAMOND : DYnamics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains

GNSS : Global Navigation Satellite System

GSMaP : Global Satellite Mapping of Precipitation

JMA-NHM : Japan Meteorological Agency-NonHydrostatic Model

JNoVA : "JMA Nonhydrostatic Model"-based Variational Data Assimilation System

LES : Large Eddy Simulation

LETKF : Local Ensemble Transform Kalman Filter

LPF : Localized Particle Filter

MSM : Meso-Scale Model

MYNN : Mello-Yamada-Nakanishi-Niino Turbulence Closure model

MYNN3 : Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino level3

NAPEX : Numerical Analysis and Prediction EXperiment system

NHM-RPF : Particle filter with Japan Meteorological Agency-NonHydrostatic Model and adaptive R estima-

tor
NICAM : Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model
OSSE : Observing System Simulation Experiment
PRE : Predecessor Rain Event
QBO : Quasi-Biennial Oscillation
QLCS : Quasi-Linear Convective System
SCALE-LT : Scalable Computing for Advanced Library and Environment-LighTing Model
SCALE-RM : Scalable Computing for Advanced Library and Environment-Regional Model
SPEEDY : Simplified Parameterizations, primitivE-Equation Dynamic Model
SST : Sea Surface Temperature
WRF : Weather Research and Forecasting model
WLRAS : Weather Research and Forecasting model-Local Ensemble Transform Kalman Filter Radar Assimilation System

参 考 文 献

川島ほか, 2014 : 第15回非静力学モデルに関するワークショップの報告. 天気, **61**, 211-218.
Saito, K., 2019: On the northward ageostrophic winds associated with a tropical cyclone. SOLA, **15**, 222-227.
Stevens, B. *et al.*, 2019: DYAMOND: The DYnamics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains. Prog. Earth Planet. Sci., **6**, 61.
Tsai, C.-C., S.-C. Yang and Y.-C. Liou, 2014: Improving quantitative precipitation nowcasting with a local ensemble transform Kalman filter radar data assimilation system: Observing system simulation experiments. Tellus A, **66**, 21804, doi:10.3402/tellusa.v66.21804.
Yoshida, R. *et al.*, 2010: Global analysis of cloud phase and ice crystal orientation from cloud-aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observation (CALIPSO) data using attenuated backscattering and depolarization ratio. J. Geophys. Res. Atmos., **115**, D00H32, doi:10.1029/2009JD012334.