

第24回非静力学モデルに関するワークショップ開催報告

日下博幸^{*1}・佐藤拓人^{*2}・奥川 暲介^{*3}・小原涼太^{*4}
田上雅浩^{*5}・雨宮 新^{*6}・近藤 誠^{*7}

1. はじめに

日本気象学会の非静力学数値モデル研究連絡会は、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、高精度非静力学モデルの力学フレームの開発、高精度非静力学モデルのための物理過程パラメタリゼーションの開発を目的として設立された研究連絡会である(非静力学数値モデル研究連絡会ホームページより)。研究連絡会の具体的な活動の一つとして、これまで非静力学モデルに関するワークショップを開催してきた。このワークショップは、非静力学モデルの開発および改良に向けて開発者・利用者の双方の幅広い情報交換の場を目指して行われている。2022年度は、筑波大学計算科学研究センターが事務局となつて、筑波大学計算科学研究センターでの現地開催とオンラインによるハイブリッド形式で、2022年12月19日から20日に、第24回非静力学モデルに関するワークショップを開催した。2日間とも、現地会場(筑波大学)で20名程度、オンラインで30名程度の参加者があり、合計21件の発表があった。

本年度も、マイクロスケールのLESモデルから全球スケールのGCMまで、現業モデルから研究用モデルまで、そして、基礎研究から応用研究まで、非静力学モ

デルに関する幅広い議論が行われた。例えば、局地モデルや、物理過程、データ同化システムの開発、非静力学モデルを用いた現象の解析に関する発表が行われた。

本稿は、本ワークショップ内に設けられた六つのセッションの発表内容をまとめたものである。本報告を読むことで、非静力学気象モデルの開発やモデルの利用に関する現在の動向をある程度知ることができると思われる。非静力学モデルに興味のある方もない方も、ぜひ読んでみて、非静力学モデルの開発・利用状況を感じとっていただきたいと思う。各発表の講演要旨を、本ワークショップのホームページ(<https://sites.google.com/view/nhm2022>, 2023.5.9閲覧)で公開しているのので、より詳しい内容を知りたい方はそちらもあわせて参照されたい。

(日下博幸)

2. セッション1

セッション1では4件の講演があった。

徐盟庚・竹見哲也(京都大学)は、WRFを用いて熱帯低気圧の理想実験を行い、熱帯低気圧の日周変動と太陽放射の日周変動の関係を調べた。太陽放射の日周変動有り無しの実験結果から、太陽放射の日周変動が熱帯低気圧の発達や維持、日周変動に影響を与えることが示唆された。

小野耕介(気象研究所/北海道大学)・稲津 将(北海道大学)は、2021年8月13日~14日に九州北部で線状降水帯が観測された事例について気象庁局地モデルを用いた実験を行い、メソ対流系の予測における初期摂動の時間発展と非線形性について調べた。予報開始12時間後に、梅雨前線に沿った摂動の強い非線形性が確認できることを示し、初期摂動を変更した感度実験の結果から対流活動に伴う重力波がこの強い非線形性に関与していることが示唆された。

*1 (連絡責任著者) Hiroyuki KUSAKA, 筑波大学計算科学研究センター。

kusaka@ccs.tsukuba.ac.jp

*2 Takuto SATO, 筑波大学計算科学研究センター。

*3 Ryosuke OKUGAWA, 気象庁数値予報開発センター。

*4 Ryota OHARA, 東北大学大学院理学研究科。

*5 Masahiro TANOUE, 気象庁気象研究所。

*6 Arata AMEMIYA, 理化学研究所計算科学研究センター。

*7 Makoto KONDO, 北海道大学大学院理学院。

© 2023 日本気象学会

前島康光（理化学研究所）ほかは、2021年夏季に実施した30秒ごとに更新するリアルタイムゲリラ豪雨予測実験の概要と、予測において新たに発生する降水の表現が不十分であった事例の解析結果を報告した。この降水予測が不十分であった事例について、対流が発生・成長できる環境場が予測されていたものの雲水量が過小であったことを示し、解析値の雲水量を人為的に増加させることで、その後の予測においてレーダー観測に近い降水を予測できることを示した。

田上雅浩（気象研究所）ほかは、NICAM-LETKFを用いた水同位体データ同化システムを構築し、理想実験を行い、衛星観測による水同位体比を同化した場合に解析精度の向上が得られるかどうかを調べた。衛星観測による水同位体比を同化することにより、従来観測のみを同化した場合よりも気温のRMSEが減少し、解析精度が向上することを示した。

（奥川椋介）

3. セッション2

セッション2では、物理過程の改良や導入に関する4件の講演があった。

幾田泰醇（気象研究所）ほかは、地上偏波レーダーと光学式ディストロメーターを参照値とした気象庁非静力学モデル asuca における雲微物理スキームの改良に関する調査を行った。観測に基づいて雨滴粒径分布を変更するとともに雪粒子に3種類の形状を導入する改良を行い、令和元年房総半島台風事例において改良後のスキームがより観測に近づくように改善されたことを確認した。

奥川椋介（気象庁数値予報開発センター）ほかは、新しい科学的知見が取り込まれており、気象庁メソモデル MSM でも導入されている雲物理過程を局地モデル LFM に導入した場合の効果について報告した。LFM への導入によって、衛星観測との比較や夏季の降水に関して改善が見られた一方で、冬季の冬型降雪事例においては精度が悪化することを報告した。

山崎行浩（気象庁数値予報開発センター）ほかは、高解像度領域モデルでこれまでほとんど考慮されていなかったサブグリッドスケールの地形性乱流による抵抗の効果を asuca に実装した場合の効果を調査した。その結果、従来下層で見られていた強風バイアスが改善し、降水や気温についても改善が見られた。

川田英幸（気象庁数値予報開発センター）ほかは、数値予測モデル本体の不確実性による誤差を与えるた

めの手法として確率的物理過程強制法（SPPT法）を気象庁メソアンサンブル予報システム（MEPS）に導入し、その結果を報告した。SPPT法の導入によって、降水確率予測の悪化を抑えつつスプレッドの空間分布が従来に比べて適正化されることを示した。

（小原涼太）

4. セッション3

ワークショップ1日目の最後のセッションであるセッション3では、過去に発生した事例をシミュレーションした3件の講演があった。

鈴木信康（筑波大学）ほかは、東海～関東地方で発生した取束線を対象に、取束線の出現域ごとに風系の特徴と地形の力学的効果の観点から解析した。まず、静止気象衛星画像データを用いて、取束線の出現域別に四つに分類した。それぞれについて一般風の風速・風向を調べたところ、取束線の出現域と風速・風向とに関係があることがわかった。この解析結果をもとに、取束線の出現域で分類した事例群に特徴的な一般風を定め、その条件に合致する気象場のアンサンブル平均を初期値とする数値シミュレーションを行った。これにより、それぞれの一般風に対応した取束線による積雲の列が再現された。著者らは、一般風の風速に依存するコリオリ力により流れ場が変形され、取束線の出現域に影響があるのではないかと考察した。

小原涼太（東北大学）は、2020年1月8日に寒冷前線に伴って高知県で発生した竜巻について、JMANHMによる再現実験を行った結果について報告した。水平解像度を2 km, 300m, 80mと変えて、それぞれネスティングする形で三つの数値実験を行った。その結果、80m解像度の実験では、二つの竜巻性の渦がシミュレートされた。この再現された渦は、実際に観測された位置と時間に近かった。二つの渦は強いエコー強度を持つが、その間には狭くて弱いエコー強度の領域があることを報告した。渦度の時間変化についての解析も行い、再現された竜巻を詳しく調査した。

小野佳祐（東北大学）は、2013年8月9日に秋田県・岩手県で発生した線状降水帯の数値シミュレーションについて報告した。水平解像度を1 kmとした実験を実施し、秋田県と秋田・岩手県境付近に発生した二つの線状降水帯を再現することに成功した。シミュレーションの解析結果を用いて、線状降水帯がバックアンドサイドビルディング型と呼ばれる構造を示していることを明らかにした。これら線状降水帯の発生は地形によ

る影響が考えられ、白神山地や太平山地を除去した感度実験を行った。その結果、除去された地形の風下にあたる線状降水帯がうまく発生せず、さらに風下に位置する別の線状降水帯が強化される例などを報告した。

(田上雅浩)

5. セッション4

セッション4（ワークショップ2日目最初のセッション）では、データ同化に関する発表が3件あった。

瀬古 弘（気象研究所）ほか、マイクロ波放射計（MWR）の観測結果および海上におけるドローン観測のデータを用いたデータ同化に関して報告した。九州で降水が確認された事例に対して同化インパクトを調査したところ、MWRを同化する場合もドローン観測を同化する場合も予測精度の向上が期待できるものであった。

雨宮 新（理化学研究所）ほか、SCALE-LETKFをベースにした局所粒子フィルタの実装に関して報告した。傾圧不安定実験による動作確認を行ったところ、安定した動作を確認した。また、特に大規模実験への適用に向けた最適化等が必要である点を指摘した。

藤田 匡（気象研究所）ほかは種々のスケールを持つデータを同化する手法として、背景誤差の流れ依存性、スケール依存性を考慮する手法を紹介した。提案手法はウェブレット空間におけるアンサンブル制御変数を導入するものである。この手法を用いることで、観測データのスケールの情報を積極的に反映できることを示した。

(佐藤拓人)

6. セッション5

セッション5では、LESの開発や応用研究に関する4件の講演があった。

渡邊俊一（気象研究所）ほか、LESを用いた対流雲内のサブグリッド輸送の検討について報告した。水平格子間隔が数kmのconvection-permittingモデルにおいて対流雲内の鉛直輸送をスケール相似則に基づき計算するための2種類の定式化について、Ito *et al.* (2021) の線状降水帯の理想化実験を題材とし、水平格子間隔125mの気象庁非静力学モデル asuca を用いて計算したデータを用いて検証を行った。

日下博幸（筑波大学）ほか、都市街区気象LESモデルCity-LESを紹介し、その精度検証について報告した。空間分解能4mのCity-LESを用いて行った東京駅周辺の暑熱環境の計算について、ヘリ観測や実地観

測によるデータを用いて街区単位での風と気温の空間分布の再現性を検証し、おおむね良好な結果を確認した。

佐藤拓人（筑波大学）ほかは、対流境界層を対象としたLESのための流入境界条件の相互比較について報告した。City-LESを用いた実験で、流入境界における渦の生成手法について、一様乱数を用いる方法、Recycle-rescale法、デジタルフィルタに基づく方法、およびCell-perturbation法の4種類を相互に比較検討を行った。

伊藤純至（東北大学）ほかは、瞬時的な地表面フラックス診断のLESへの導入について報告した。Mouri and Ito (2022) で新たに提案した手法を用いてLESで中立エクマン層の計算を行い、従来のバルク法と比較して風速の分散の再現性が改善することを示した。また、実装時の数値安定性の課題についても議論した。

(雨宮 新)

7. セッション6

セッション6では、突風やおろし風といった風を対象に数値実験や理論式を用いて調査した研究に関する3件の講演が行われた。

近藤 誠・佐藤陽祐（北海道大学）は、突風に先行する雷活動の激化の解明を目的に気象雷モデルSCALE (Nishizawa *et al.* 2015; Sato *et al.* 2015, 2019) を用いてダウンバースト事例を対象とした数値実験を行い、ダウンバースト発生前の雷活動激化時の電荷分離特性における雪と気温の影響を報告した。

佐藤宏樹・竹見哲也（京都大学）は、OpenFOAM（数値流体解析ツール）を用いた数値実験でらせん状の流線と漏斗状の等圧面を持つ竜巻状の流れ場を作成し、地表面粗度の高さや密度を変更した実験により粗度が接線風速と角運動量へ与える影響を報告した。

浅野裕樹・日下博幸（筑波大学）は、山脈の幅がおろし風に与える影響をCloud Model 1 (Bryan and Fritsch 2002) を用いた数値実験から調査を行い、狭い山幅ではおろし風が抑制されることを示した。さらにLong (1955) の式を解析的に解くことでよどみ層下を通る流線の鉛直変位とその下の地形の高さの関係式を導出し、理論的なおろし風の発生条件を報告した。

(近藤 誠)

8. おわりに

事務局からワークショップの運営面を中心に報告する。今回のワークショップは対面・オンラインのハイ

ブリッド開催であったため、準備・運営ともに複雑な点もあった。そのような中でも、対面・オンラインともに活発な議論を交わしていただき、大変安心した。

講演及びその後の質疑応答は概ねスムーズに行われたものと思われる。質疑は主に対面の参加者からなされたが、オンラインからも質問がありそれに答える場面や、会場でなされている議論に対してオンラインからフォローアップする場面もあった。

今回はハイブリッド開催という例年にない形態での開催であった。特に今後の情勢や、遠方の方でも参加がしやすいというメリットもあることから、今後もこのようなハイブリッド形式で開催する可能性もあるだろう。その際の一助となることを期待して、事務局にて気づいた点を簡単にまとめる。

まず発表に関してまとめる。今回のワークショップは聴講者のみならず発表者にもオンラインからの参加者があった。機材のトラブル等に対応できるように、オンラインの発表者は各セッションの先頭(当日最初の発表や休憩後最初の発表)とすることで、機材テストや準備の時間を確保した。対面での発表者には、自身の端末からオンラインに接続して、画面を共有した上で発表いただいた。しかし、この方法では各発表者の通信環境や端末によって遅延等が発生してしまった。安定した環境で行うために、データを事前に預かり事務局の端末から共有を行う等の措置を講じた方が良かったものと思われる。今回のワークショップではそれを当日にアナウンスしたが、事前に行う方が良いだろう。

次に聴講者についてまとめる。今回は聴講のみの場合でも申し込みを必須とし、申込者にオンライン会場の接続情報を共有した。しかし、開催日ごく近くに申し込みをいただいた方への情報共有が遅くなってしまったので、締め切りの設定等を工夫するべきであった。また、オンラインから参加いただいた方でカメラを有効にして参加いただいた方もいたが、会場の機材の都合で映像を共有できなかった。この点は会場設置の際に工夫が必要であろう。

オンラインからの質疑の確認のため事務局で確認用にオンライン会場に入る端末を用意した。これを各セッションの座長と適宜確認をとりながら進行したため、円滑だったものと思われる。

(佐藤拓人)

略語一覧

GCM : General Circulation Model 大気大循環モデル

JMANHM : Japan Meteorological Agency NonHydrostatic Model 気象庁非静力学モデル
 LES : Large Eddy Simulation ラージ・エディ・シミュレーション
 LETKF : Local Ensemble Transform Kalman Filter 局所アンサンブル変換カルマンフィルタ
 LFM : Local Forecast Model 気象庁の局地モデル
 MEPS : Meso-scale Ensemble Prediction System 気象庁のメソアンサンブル予報システム
 MSM : Meso-Scale Model 気象庁のメソモデル
 MWR : MicroWave Radiometer マイクロ波放射計
 NICAM : Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model 非静力学正20面体格子大気モデル
 RMSE : Root Mean Squared Error 二乗平均平方根誤差
 SCALE : Scalable Computing for Advanced Library and Environment
 SPPT : Stochastically Perturbed Physics Tendencies 確率的物理過程強制法
 WRF : Weather Research and Forecasting

参考文献

- Bryan, G. H. and J. M. Fritch, 2002: A benchmark simulation for moist nonhydrostatic numerical models. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2917-2928.
- Ito, J., H. Tsuguchi, S. Hayashi and H. Niino, 2021: Idealized high-resolution simulations of a back-building convective system that causes torrential rain. *J. Atmos. Sci.*, **78**, 117-132
- Long, R. R., 1955: Some aspects of the flow of stratified fluids III. Continuous density gradients. *Tellus*, **7**, 341-357.
- Mouri, H. and J. Ito, 2022: Momentum flux fluctuations in wall turbulence: A formula beyond the law of the wall. *Phys. Fluids*, **34**, 035109, doi:10.1063/5.0074889.
- Nishizawa, S., H. Yashiro, Y. Sato, Y. Miyamoto and H. Tomita, 2015: Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations. *Geosci. Model Dev.*, **8**, 3393-3419.
- Sato, Y., S. Nishizawa, H. Yashiro, Y. Miyamoto, Y. Kajikawa and H. Tomita, 2015: Impacts of cloud microphysics on trade wind cumulus: which cloud microphysics processes contribute to the diversity in a large eddy simulation?. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **2**, 23, doi:10.1186/s40645-015-0053-6.
- Sato, Y., Y. Miyamoto and H. Tomita, 2019: Large dependency of charge distribution in a tropical cyclone inner core upon aerosol number concentration. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **6**, 62, doi:10.1186/s40645-019-0309-7.