

第22回非静力学モデルに関するワークショップ開催報告

石田 純一^{*1}・和田 章義^{*2}・栃本 英伍^{*3}・杉本 志織^{*4}
三好 建正^{*5}・澤田 謙^{*6}・佐藤 陽祐^{*7}・太田 行哉^{*8}

1. はじめに

2020年11月11日～12日に第22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)がオンラインで開催された。

本ワークショップは、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毎年開催されており、今回で22回目の開催となった。コロナ禍もあいまって、今回は気象庁数値予報課の共催により初のオンラインでの開催となった。

今回のワークショップでは、従来と同様に、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関する幅広いトピックを議論の対象とし、また今回は気象庁の提案により、学官連携も対象に含めて情報交換を行った。

今回のワークショップは2日間で6つのセッション、計26件の講演が行われ、参加者は2日間で102人となった。気象庁内からも、数値予報課や気象研究所の多くの職員の参加があった。また、このワークショップとしては初のオンライン開催であったが、現地開催と同様に活発な議論が行われた。

以下に、各セッションの内容について各座長から報

告いただく。なお、ワークショップのウェブサイト(http://nhmws2020.kishou.go.jp/NHMWS2020_program.pdf)に講演要旨を掲載しているため、こちらも参照されたい。

(太田行哉)

2. セッション1

セッション1では台風に関する数値シミュレーション研究について4件の講演があった。

平野創一郎(琉球大学)ほかは、2018年台風第24号について、航空機観測で見られた深い対流雲と大気海洋相互作用との関連を気象庁非静力学大気モデルと大気海洋結合モデルを用いて調査した。台風域の海面水温低下による眼の壁雲域における加熱の減少及び壁雲の外側への移動が眼の領域での下降流を弱めることにより、深い対流の形成に好都合となったことを示した。

和田章義(気象研究所)ほかは、2020年台風第10号の多重眼構造と台風強度への大気海洋相互作用の影響について、気象庁非静力学大気モデル及び大気波浪海洋結合モデルを用いて調査した。この台風は強度の予測が過大となっていたのだが、海面水温初期場を調整することよりも台風による海面水温低下を適切に表現することの方が台風強度の予測に効果的だったこと、衰弱期に眼の壁雲からの外出流により乾燥域が形成された可能性があることを示した。

飯塚 聡(防災科学技術研究所)ほかは、2019年台風第19号について、非静力学モデルWRFを用いて、北海道・東北沖合の暖水域が日本域の降水に与える影響について調査した。海面水温場に関する感度実験結果から、暖水渦域における高海面水温偏差が、東北太平洋沿岸海域での記録的な大雨に寄与していた可能性を示した。

*1 Junichi ISHIDA, 気象庁数値予報課.

*2 Akiyoshi WADA, 気象研究所台風・災害気象研究部.

*3 Eigo TOCHIMOTO, 防災科学技術研究所.

*4 Shiori SUGIMOTO, 海洋研究開発機構.

*5 Takemasa MIYOSHI, 理化学研究所.

*6 Ken SAWADA, 気象研究所気象観測研究部.

*7 Yousuke SATO, 北海道大学理学研究院.

*8 (連絡責任著者) Yukinari OTA, 気象庁数値予報課.
nhmws2020@npd.kishou.go.jp

© 2021 日本気象学会

齊藤和雄（東京大学大気海洋研究所/気象研究所/気象業務支援センター）・松信 匠（筑波大学/ミュンヘン大学）は、2009年台風第18号に伴う北向きの非地衡風がPREと呼ばれる台風から離れた場所での降水に与える影響について、気象庁非静力学モデルを用いて調査した。北向きの非地衡風による中上層の加湿が台風本体から離れた西日本での降水を強化した可能性を示した。

（和田章義）

3. セッション2

セッション2では、主に降水に関する研究について5件の講演があった。

谷田貝亜紀代（弘前大学）ほかは、NHRCMを用いて、APHRODITEの日降水量データの改良および降水日変化の検証を行った結果を紹介した。APHRO_JP内挿時の気候値をJMAメッシュ気候値からNHRCM気候値に差し替えた結果、北日本における日本海側の降水量が改善したことを示した。加えて、日本海側の4つのダムにおいて、水収支誤差も改善したことを示した。また、APHRO_JPで見られる日変化をNHRCMは1月も7月も表現できていることを示した。

寺崎康児（理化学研究所）・三好建正（理化学研究所）は、NICAM-LETKFを用いて、令和2年7月豪雨の1024メンバーアンサンブル実験を行った。1024メンバーの実験結果の中から複数のサブサンプリングを行い、サンプル数に対する予測可能性の変化を評価した。サブサンプル数を増やすと、九州付近の大雨の確率的予測が改善することを示した。また、アンサンブル相関解析を行い、九州付近の湿潤な大気との有意な相関が見られることを示した。

小原涼太（東北大学）ほかは、2019年10月25日に関東で発生した大雨について、JMANHMを用いて再現実験を行い、地形および境界層スキームに対する降水の感度を調べた。地形データとして格子内平均標高（mean orography）と格子内最大標高（envelope orography）を用いた実験の比較では、envelope orographyを用いた実験の方が寒気をより南東に張り出し、それに対応して降水をより南東に再現していた。また、境界層スキームにDeardorffとMYNN3を用いた実験の比較では、Deardorffの方が降水の位置を良く再現していた。この違いは、スキームによる境界層の混合の違いがCold air dammingの張り出しに影響したことに起因していたことを示唆した。

栃本英伍（防災科学技術研究所）・飯塚 聡は、2020年4月13日に三重県尾鷲市で発生した大雨について、WRFを用いた再現実験を行った。その結果、尾鷲での大雨は、温帯低気圧の寒冷コンベアベルトに伴う東風が尾鷲付近で収束し、上昇することで発生していた。また、黒潮大蛇行に伴う東海沖の海面水温（SST）の昇温の影響を調べるために、東海沖におけるSSTの、気候値からの偏差を差し引いた実験（ANM）を行い、標準実験（CNTL）と比較した。その結果、ANMでは、CNTLよりも12時間、3時間、1時間降水量全てにおいて減少しており、黒潮大蛇行に伴うSST昇温が尾鷲の大雨に寄与していたことを示した。

瀬古 弘（気象研究所）はNHM-LETKFを用いた21メンバーのアンサンブル実験を行い、平成30年7月豪雨の環境場を、相関解析を用いて調べた結果を紹介した。相関解析の結果、太平洋高気圧の縁辺に沿った南からの水蒸気フラックスに加えて、北西からの水蒸気フラックスに相関があることを示した。後方流跡線解析を用いて空気塊の起源も調べ、九州北部の気塊は北西と南西から来ていたことを示した。また、下層の水蒸気よりも、上層のトラフの方が長い時間相関が維持されていたことを示した。

（栃本英伍）

4. セッション3

セッション3ではユニークな視点で実施された4件の講演があった。

Pin-Ying Wu（京都大学）・竹見哲也（京都大学）は、湿潤対流の再現性に対する地形の影響を調べるために、潮岬で観測された大気鉛直プロファイルを用いて山岳有り無しの理想化実験を行った。コントロール実験に加え、ある時刻の水蒸気混合比に摂動を与える実験を行い、両実験の差を“difference total energy (DTE)”で見積もった。山岳の有無にかかわらず、DTEは湿潤対流の形成と強く関連しており、雲サイズに比例して大きくなった。山岳有り実験では斜面の大気不安定に応じて午前の早い時刻から湿潤対流が発生しやすく、その後も雲はより大きく発達する傾向がみられた。このことから、山岳周辺における湿潤対流の発生・発達にかかわる誤差増幅を抑制することが湿潤対流の再現精度向上にとって重要であるとの見解を示した。

杉本志織（海洋研究開発機構）ほかは、夏季にヒマラヤ山脈周辺で発生する夜雨の発生に着目し、2003～

2010年のモンスーン最盛期を対象とした水平解像度 2 km の数値実験を行った。ヒマラヤ斜面および南麓での降水分布およびその日変化が適切に再現できた。また、まとまった降水が発生した事例を抽出し合成解析を行うことで、ヒマラヤ周辺の微地形や山風の発生が夜間降水の再現性を左右する可能性を示した。

高橋 洋（東京都立大学）は、2018年1月下旬の降雪事例を対象とし、太平洋側の海面温度（SST）と関東における降雪の関係について解析した。合成解析の結果、本州南の海域および北関東～南東北域の東海上で SST が低下しており、前者は黒潮大蛇行と関連していた。また、両海域の SST を 2℃ 昇温させたアンサンブル感度実験から、対象事例の大雪発生においては、特に北関東～南東北東海上沖の SST に感度を持つ北東からの冷気流入の重要性を示唆した。

神谷明住香（名古屋大学）ほかは、平成30年7月豪雨事例を対象としたコントロール実験を実施した後、豪雨発生域に流入する水蒸気の鉛直分布に着目した3種の感度実験を行った。感度実験では、後方流跡線解析によって風上領域を特定した上で、その領域における相対湿度の初期・境界値を鉛直全層、中層のみ、下層のみのいずれかで10%減少させた。鉛直全層および下層のみで相対湿度を減少させた実験では降水量が大きく減少した。一方、中層の相対湿度のみを変化させた実験では、経路途中の海上で積雲対流が発生し大気中層が再度加湿されたため、降水量への影響は小さかった。このことから、大気下層での水蒸気輸送が豪雨の発生に重要であったことを示した。

（杉本志織）

5. セッション4

セッション4では、気象庁メソアンサンブル予報システム（MEPS）や30秒ごとに更新するゲリラ豪雨予報システムに関して4件の講演があった。

欠畑賢之（気象庁）ほかは、MEPSのアンサンブル摂動の算出方法の改良について報告した。初期値の摂動にはメソモデルの特異ベクトルを使っているが、この際のターゲット域から下層渦度が小さい格子点を除くことで、日本周辺の降水によりよく対応した摂動が算出されるよう改善した。また側面境界値の摂動は全球モデルの特異ベクトルから与えているが、この際のターゲット域を日本周辺に狭め、トータルエネルギーノルムの温度項の重みを増やすなどの変更を行い、改善した。

川田英幸（気象庁）ほかは、欠畑の発表に続き、MEPSの改善に向け、新たにモデルの不確実性を考慮するための確率的物理過程強制（SPPT）法の開発について報告した。SPPT法の有効性を実験によって確認し、SPPT法以外の手法との併用など今後の開発方針を議論した。

三好建正ほかは、2020年夏季に実施した30秒ごとに更新するゲリラ豪雨予報のリアルタイム実証実験について概要を報告した。フェーズドアレイ気象レーダー（PAWR）の30秒ごとの観測データを高解像度モデルに同化し30分後までの予報を行う「ビッグデータ同化」システムを2013年から開発してきた。今回、埼玉 MP-PAWR を使って500m メッシュの予報を30秒ごとにリアルタイムで実行することに成功した。

雨宮 新（理化学研究所）ほかは、三好の発表に続き、30秒ごとの埼玉 MP-PAWR 観測データを同化するシステム開発に関して報告した。観測データの間引き方法、「降水なし」観測データの同化方法、ドップラー速度の同化方法について詳細な報告を行った。

（三好建正）

6. セッション5

セッション5では、4件の講演があった。

澤田 謙（気象研究所）は、数値天気予報の予報初期にみられる過剰（もしくは過少）降水の問題に対して、変分法同化システムにおいて過飽和状態に対する制約を課すことで、その問題が軽減できることを報告した。気象庁数値予報課開発の非静力学メソ4次元変分法データ同化システム（JNoVA）に外点ペナルティ関数法により過飽和制約を組み込んだシステムが用いられ、平成30年7月豪雨事例にて、解析値における温度場・水蒸気場の品質向上に伴う初期ショックの軽減と、予報初期の降水再現性の向上が示された。

近藤圭一（気象研究所）・三好建正は、背景場の非ガウス分布を定量的に評価し、既存のアンサンブルカルマンフィルタ（EnKF）を拡張した非ガウスデータ同化手法について発表した。1つは非ガウス分布強度に応じた観測誤差を膨張させる動的観測誤差膨張手法、もう1つはEnKFと局所粒子フィルタ（LPF）を組み合わせたハイブリッド同化手法である。簡易大循環モデル SPEEDY を用いたアンサンブル数80のデータ同化実験では、非線形観測演算子を用いた場合にハイブリッド同化手法の精度が最も高く、次に動的観測誤差膨張手法となり、EnKFの精度を上回ることを確認し

た。

佐藤正樹（東京大学）ほかは、関東圏に多数存在するレーダー等の観測により高解像度数値モデルを検証・改良するために推進している ULTIMATE プロジェクトについて発表した。EarthCARE 衛星（2022年度打ち上げ予定）の地上検証に向けて情報通信研究機構（小金井市）にライダー・レーダーの設置が進められており、これらのデータを核に、数値モデルの雲・降水過程の検証が行われる。また、気象庁における現業の二重偏波ドップラーレーダーやウィンドプロファイラー等も利用される。講演では、2019年9月の房総半島台風襲来時の事例について、NICAM によるシミュレーションと観測との比較結果が示された。

Woosub Roh（東京大学）ほかは、高解像度数値モデルの検証・改良のための関東領域での ULTIMATE プロジェクトにおける衛星データ・シミュレーター（Joint Simulator）の開発進展状況とその応用例について発表した。Joint Simulator は、数値気象モデルの仮想的な大気データから衛星センサの疑似観測データを作成するために開発されたものであり、今日では偏波レーダーシミュレーター（POLARRIS）も実装されている。講演では、2019年9月15日の成田空港の偏波レーダーを対象とした事例が取り上げられ、in-situ 観測のシミュレーションを行う際の問題点が議論された。（澤田 謙）

7. セッション6

セッション6ではラージ・エディター・シミュレーション（LES）モデルを用いた高解像度数値実験や従来の気象モデルでは扱われてこなかった物理コンポーネントを実装したモデルを用いた数値実験による研究に関する5件の講演が行われた。

本セッションの前半3件の講演は理化学研究所で開発された気象・気候ライブラリ SCALE (Nishizawa *et al.* 2015; Sato *et al.* 2015) を用いた研究に関する講演である。

佐藤陽祐（北海道大学）ほかは、雷モデル (Sato *et al.* 2019) を実装した SCALE を用いた数値実験の結果と、雷放電観測の LIDEN との比較を通して行った雷モデルの検証について報告した。

山崎一哉（東京大学）・三浦裕亮（東京大学）は、SCALE を用いて台風を対象とした高解像度実験を行い、台風のアウトフロー領域で生じるトランスパースラインの形成メカニズムに関して、ラジオゾンデ観測

との比較や安定性解析を通して行った考察について報告した。

柳瀬友朗（理化学研究所/京都大学）ほかは、SCALE を用いた数値実験の結果から提案した、湿潤対流の自己組織化が発生する条件に関する臨界長さ (Yanase *et al.* 2020) を報告した。

千賀幹太（京都大学）ほかは、都市気象 LES モデル (山口ほか 2016) を用いた理想実験により上昇流と渦管の組織化を再現し、この組織化が積乱雲の発生に重要な役割を果たすことを報告した (山口ほか 2020)。

吉村僚一（東北大学）ほかは、WRF-ARW (Skamarock 2008) の LES モードを用いた数値実験により、2014年12月16日に発生した晴天乱気流がケルビン・ヘルムホルツ不安定によって発生していたことを報告した。

(佐藤陽祐)

8. おわりに

最後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。冒頭で述べたとおり、今回のワークショップは初めてのオンライン開催であったが、多数の方に参加いただき、何人かの参加者からは「良いワークショップだった」とおっしゃっていただいた。事務局として、ようやく肩の荷が下りて安心したところである。

講演・質疑応答・総合討論は順調に行われたと思う。講演・質疑応答は本稿で各セッションの座長から報告されている通り、活発な議論が行われた。総合討論においては、気象庁数値予報開発センターの佐藤芳昭数値予報モデル技術開発室長から、数値予報開発センターの紹介をしていただくとともに、官学連携に向けた意見交換も行われた。

今回のワークショップはコロナ禍のため、当初の予定とは大きく異なる形での開催となったことから簡単に経緯を述べる。当初、国際ワークショップとして京都で開催予定であったが、急遽国内ワークショップかつ完全オンライン開催となり、事務局も変わる事となった。気象庁数値予報課においては、大学等研究機関との連携を推進しており、会合をホストすることで連携の強化につながることを期待し、今回立候補したものである。なお、本ワークショップには毎回気象庁の数値予報課職員が参加していること、数値予報課コロキウムのオンライン聴講を実施してきておりオンライン会議システムの利用実績があったことなども立候

補の背景にあった。このような経緯があったものの、多くの方々（後述）にご協力いただいたおかげで、当初予定していた2020年11月に開催できた。

初めてオンライン開催を実施した事務局の立場から、いくつか気づいた点や総合討論などでいただいた意見等を、今後の参考のために簡単にまとめる。国外からの参加者、（これまで参加の機会があまり無かった）初めての参加者、2日間フルの参加ではなく一部の時間を会議等で抜けるという参加者などがあり、オンライン開催のおかげで参加しやすかったと思われる。一方、講演のプログラムを組む際に不都合な時間帯を避ける必要があるため、講演申し込みフォームに不都合の時間帯を加えるのが良かったと思われる。また、従前のワークショップでは、聴講のみの場合は事前登録が不要だったことから、戸惑われた方もいたことから、周知の際には相違点を目立つようにするとより良いであろう。会合の直前に、事務局と講演者としてオンライン会議システムの細かい使い方（例えば、スライドの共有の仕方など）を含めて事前テストを行った。これは当日のスムーズな運営にとって有効であった。オンライン会議ならではの特徴として、質問をチャットで受け付ける際に座長が気づきにくいので、事務局がフォローする必要があった。また、顔が見えた方が良いというご意見をいただき、総合討論の際に多くの参加者にご協力いただきビデオ接続いただいた（壮観であった）。しかし、多数の参加者がビデオ接続すると負荷が大きいことから、ビデオ接続者の数を絞る（例えば、講演者・座長・質問者のみ、など）ことが必要であろう。

ワークショップの開催に際しては多くの方にお世話になった。非静力学数値モデル研究連絡会の皆様には開催準備などの運営について様々なご助言をいただいた。また、気象研究所瀬古 弘気象観測研究部長及び永戸久喜研究調整官からは、気象研究所で2018年にワークショップを開催した経験を踏まえたご助言をいただいた。開催から本報告執筆までの多くのロジは数値予報開発センターの数値予報モデル基盤技術開発室の評価チーム（上口賢治調査官、根本 昇技術専門官、荒井宏明技術専門官、松川知紘技官）に対応いただいた。さらに当日は数値予報開発センター数値予報モデル技術開発室にご協力いただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

（石田純一）

略語一覧

- APHRODITE: Asian Precipitation—Highly-Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation of the Water Resources アジアの水資源への温暖化評価のための日降水グリッドデータの作成プロジェクト
- EarthCARE: Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer 日本と欧州が協力して開発を進める地球観測衛星
- EnKF: Ensemble Kalman Filter アンサンブルカルマンフィルタ
- JMA: Japan Meteorological Agency 気象庁
- JNoVA: JMA Nonhydrostatic model based Variational Data Assimilation 気象庁非静力学モデルに基づいた変分法データ同化
- LES: Large Eddy Simulation 大規模乱流シミュレーションのひとつ
- LETKF: Local Ensemble Transform Kalman Filter 局所アンサンブル変換カルマンフィルタ
- LIDEN: Lightning DEtection Network system 気象庁の雷監視システム
- MEPS: Meso-scale Ensemble Prediction System 気象庁のメソアンサンブル予報システム
- MP-PAWR: Multi-Parameter Phased Array Weather Radar マルチパラメータ・フェーズドアレイ気象レーダー
- MYNN3: Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino Level 3 乱流クロージャーモデルのひとつ
- NHM: Non-Hydrostatic Model 非静力学モデル
- NHRCM: Non-Hydrostatic Regional Climate Model 非静力学地域気候モデル
- NICAM: Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model 非静力学正20面体格子大気モデル
- PAWR: Phased Array Weather Radar フェーズドアレイ気象レーダー
- POLARRIS: POLARimetric Radar Retrieval and Instrument Simulator 偏波レーダーシミュレーター
- PRE: Predecessor Rain Event 台風・熱低の遠隔で発生する集中豪雨
- SCALE: Scalable Computing for Advanced Library and Environment 理化学研究所計算科学研究センターを中心に開発が進められている次世代気象気候科学における基盤ライブラリ
- SPEEDY: Simplified Parameterizations primitive-Equation Dynamics 簡易大気大循環モデル
- SPPT: Stochastically Perturbed Parameterization Tendencies 確率的物理過程強制法
- SST: Sea Surface Temperature 海面水温
- ULTIMATE: ULTRa-sIte for Measuring Atmosphere of Tokyo metropolitan Environment 数値モデルの雲検

証評価を目的とした関東圏ウルトラサイト観測連携プロジェクト

WRF: Weather Research and Forecasting model 米国大気研究センターと米国環境予測センターが共同で開発している領域モデル

WRF-ARW: Weather Research and Forecast (WRF) model-Advanced Research WRF 研究用の力学コアを用いた WRF

参 考 文 献

- 気象庁, 2018: 交通政策審議会気象分科会提言「2030年の科学技術を見据えた気象業務のあり方」について. https://www.jma.go.jp/jma/press/1808/20a/bunkakai_rep.html (2020.12.22閲覧).
- 気象庁, 2018: 「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」について. https://www.jma.go.jp/jma/press/1810/04b/nwp_strategic_plan_towards_2030_181004.html (2020.12.22閲覧).
- 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**, 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**, doi:10.1186/s40645-019-0309-7.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang and J. G. Powers, 2008: A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech. Note, **475**, doi:10.5065/D68S4MVH.
- 山口弘誠, 高見和弥, 井上 実, 中北英一, 2016: 豪雨の「種」を捉えるための都市効果を考慮する LES 気象モデルの開発. *土木学会論文集 B1*, **72**, I_205-I_210.
- 山口弘誠, 千賀幹太, 中北英一, 2020: 都市気象 LES モデルを用いた豪雨の種となる熱的上昇流と渦管の組織化の解明. *京都大学防災研究所年報*, (63B), 190-204.
- Yanase T., S. Nishizawa, H. Miura, T. Takemi and H. Tomita, 2020: New critical length for the onset of self-aggregation of moist convection. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, doi:10.1029/2020GL088763.