

## 第5回非静力学モデルに関する国際ワークショップの報告

瀬古 弘<sup>\*1</sup>・和田 章 義<sup>\*2</sup>・村田 昭 彦<sup>\*3</sup>・宮川 知 己<sup>\*4</sup>  
 竹見 哲 也<sup>\*5</sup>・福井 真<sup>\*6</sup>・川畑 拓 矢<sup>\*7</sup>・北村 祐 二<sup>\*8</sup>  
 清木 達 也<sup>\*9</sup>・堀田 大 介<sup>\*10</sup>

## 1. はじめに

2018年11月14日(水)～16日(金)に第5回非静力学モデルに関する国際ワークショップ(Fifth International Workshop on Nonhydrostatic Models, 主催:日本気象学会非静力学数値モデル研究連絡会, 気象庁)が気象庁講堂にて開催された。非静力学モデルに関するワークショップは国際ワークショップとして、2010年に京都で初めて開催され(里村ほか2011)、以後隔年で開催されている。国内開催を含め、本ワークショップは非静力学数値モデルの開発と高度利用を推進することを目的にし、発表分野は全球モデルからLESモデル、物理過程のパラメタリゼーション、データ同化や再解析、および非静力学モデルを利用した大気現象の事例解析まで多岐に亘っている。また今回のワークショップは国内・国際を合わせて20回目となることから、11月16日(金)午後にオープンセミナー「非静力学モデリングの進展と数値気象予測の今後の展望」を開催し、非静力学モデルに関わる最先端技術と社会貢献に関する話題を一般の方々を提供し

た。今回、口頭発表数34、ポスター発表数21、参加者は120名を超えるなど、これまでにない大規模のワークショップとなった(第1図)。なお、本ワークショップの講演要旨はホームページ([http://www.mri-jma.go.jp/Dep/fo/lab2/nhmws/Nonhydrostatic%20Modeling%20Workshop%20\(NHM\)%202018.html](http://www.mri-jma.go.jp/Dep/fo/lab2/nhmws/Nonhydrostatic%20Modeling%20Workshop%20(NHM)%202018.html) 2019.4.1閲覧)にて公開している。個々の詳しい発表内容についてはそちらを参照していただきたい。

(瀬古 弘・和田章義・村田昭彦)

## 2. セッション概要

## 2.1 全球モデリング

本セッションではモデル開発と数値シミュレーションに関する5件の発表があった。招待講演ではDavid Randall(米・コロラド州立大学)が大気のモデリングに用いる新たな枠組みとして渦度のCurlを予報変数とする手法「Curl-Curl」を紹介し、標準的なテスト実験の結果が良好であることを示した。吉村裕正(気象研)はダブルフリーエシ리즈(DFS)を用いる新世代の気象研全球大気モデルにおいてDFSを修正した結果の紹介を行い、極付近の高周波ノイズの除去等に効果があることを示した。宮川知己(東大気海洋研)は14km格子のNICAMにChikira-Sugiyama積雲スキームを導入することで熱対流圏中層の乾燥バイアス低減が可能であること、またハドレー循環の上昇域を北偏させる効果があることを示した。澁谷亮輔(海洋研究開発機構)は全球雲システム解像モデル比較プロジェクトの結果を紹介し、NICAM, FV3, SAMなどの参加モデルが夏季のマッデン・ジュリアン振動(MJO)と言われるBSISOについて

\*1 (連絡責任著者) Hiromu SEKO, 気象研究所, hseko@mri-jma.go.jp

\*2 Akiyoshi WADA, 気象研究所.

\*3 Akihiko MURATA, 気象研究所.

\*4 Tomoki MIYAKAWA, 東京大学.

\*5 Tetsuya TAKEMI, 京都大学.

\*6 Shin FUKUI, 東北大学.

\*7 Takuya KAWABATA, 気象研究所.

\*8 Yuji KITAMURA, 気象研究所.

\*9 Tatsuya SEIKI, 海洋研究開発機構.

\*10 Daisuke HOTTA, 気象研究所.



第1図 ワークショップの参加者。

3～4週間先まで良く再現できていたことを示した。高須賀大輔（東大大気海洋研）は熱帯に波数1の海面水温偏差を置いたNICAMの水惑星実験によって自励的に繰り返し発生するMJOらしき擾乱を作り出し、その発生・発達に関わる要素を解説した。若々しく新機軸を打ち出す大ベテラン・モデルの骨格部分の改良を担い屋台骨を支える中堅・新時代の到来を感じさせる仕事に取り組む気鋭の若手・科学に真っ直ぐ取り組む学生が揃う活き活きとしたセッションとなり、有意義な意見交換がなされた。

（宮川知己）

## 2.2 降水イベント

本セッションでは降水イベントなど中小規模の現象を対象としたモデル開発や数値シミュレーションといった話題を中心に、5件の発表があった。最初に招待講演として、Christopher Moseley（独・マックス・プランク気象研究所）がLESモデルによる高分解能での降水イベントの数値シミュレーション結果から、対流性降水セルの自動追跡アルゴリズムにより降水イベントを抽出し、モデル計算結果の妥当性を統計的に検証する研究成果について発表した。また粗度長の違いが対流活動に及ぼす影響について調べたところ、冷氣プールの広がりやの違いが生じることで対流の発達が異なることを示した。次に、Antti Hellsten

（フィンランド気象研究所）が都市域での気流や熱環境の数値シミュレーションのためのLESモデル開発について発表した。LESモデル内にLESモデルをネストする技術開発など、新しい取り組みについても紹介された。竹見哲也（京大防災研）は平成29年7月九州北部豪雨を引き起こした線状降水帯の停滞メカニズムについて、地形を高分解能で精緻に表現した167mメッシュの高分解能シミュレーションで調べた結果を発表し、モデル地形の表現性が停滞する降水系の再現に重要であることを示した。Chien-Ming Wu（国立台湾大学）は複雑地形で適用できる高分解能雲解像モデルVVMの開発状況について紹介した。地表面モデルを組み込んだVVMにより台湾における午後の雷雨の発生に及ぼすエアロゾルの影響を調べた結果、清浄大気に比べてエアロゾルの影響により雷雨の発生時刻に遅れが生じ、ピーク降水が強まるなどの影響があることを示した。Cathrene Lagare（フィリピン・アテネオ・デ・ダバオ大学）は、WRFモデルと水文モデルを結合したWRF-Hydroに基づく河川の洪水のシミュレーションモデルの開発について発表し、フィリピン・ダバオ市で2015年8月に発生した洪水のシミュレーションの結果について紹介した。地点別の雨量の再現は困難であるものの、流域圏スケールでの雨量は良好に再現でき、流量もある程度定量的に再

現できることを示した。

本セッションを通して、降水現象など中小規模現象を高分解能シミュレーションにより解析する手法は標準的になりつつあること、また都市環境問題や洪水流など水文過程といった応用問題にも研究が広がってきていることを感じた。複雑地形や都市構造など複雑地表面を対象として、より現実的な諸問題に非静力学モデルはますます応用されていくであろう。

(竹見哲也)

### 2.3 再解析とデータ同化

本セッションでは再解析とデータ同化に関し、招待講演1件を含む5件の発表が行われた。招待講演では、Per Undén (SMHI) が欧州における領域再解析の取り組みについて紹介した。同一領域を対象に複数の同化システムによる領域再解析間の比較などを示しながら、欧州連合のCopernicusを軸に、欧州各国の気象機関が互いに協力と競争をしつつ領域再解析が進められている状況を説明した。福井 真 (東北大) は日本域を対象とした領域再解析実験を行い、その結果を強雨の再現性やスピンアップ問題に着目して同化を行わない力学的ダウンスケール実験と比較することにより、領域再解析実験の高解像度手法としての有効性を示した。沢田雅洋 (気象庁) は西太平洋における台風進路予報および強度予報に対するひまわり8号の高解像度大気追跡風のデータ同化効果について調査し、特に台風の構造や指向流への影響に着目し、議論を行った。高玉孝平 (理化学研究所計算科学研究センター) は台風 Soudelor (2015年台風第13号) 事例を対象に、領域気象モデルと海洋混合層モデルを結合した大気海洋結合モデルを用いたアンサンブルカルマンフィルタによるデータ同化実験を行い、結合モデルに起因するデータ同化における問題を指摘した。本田匠 (理化学研究所計算科学研究センター) は平成30年7月豪雨を対象として、領域気象モデルを用いたアンサンブルカルマンフィルタによる解析を用いてアンサンブル予報実験を行い、西日本における豪雨の予測可能性を握っていた現象や予測精度を左右した観測について議論した。本セッションではメソスケールを対象とした領域非静力学モデルによるデータ同化を活用した成果が紹介された。手法の成熟とともに現象理解のためのツールとしてもデータ同化の存在感が今後一層増していくことが期待される。

(福井 真)

### 2.4 データ同化

本セッションでは、データ同化に関する5件の発表があった。Roland Potthast (ドイツ気象局) はドイツ気象局のメソ・全球現業システムに粒子フィルタを適用して、精度向上が見込めることを示した。メンバー数は40と極めて少ないので、局所化された粒子フィルタを用い、さらに2種類の局所化の精度を比較した。Jonathan Poterjoy (米・メリーランド大学) はやはり局所化された粒子フィルタをHWRPへ適用し、アンサンブルカルマンフィルタによるシステムよりも良い精度でハリケーンの予測が行えることを示した。ハリケーンの予測にとって位置ずれは大きな問題であるが、非線形な過程であるため粒子フィルタの方が自然に扱えるということが利点としてあげられる。川畑拓矢 (気象研) は気象庁非静力学モデルに粒子フィルタを適用し、積乱雲の発生・発達に関する確率密度分布の非ガウス性について述べた。まず発生前の上昇流に非ガウス性が見られ、これが積乱雲の発達に伴って水蒸気や気温などに伝搬した。斉藤和雄 (東大気海洋研) はLETKFにおける変換行列の非対角成分が、局所化のために隣り合うグリッドや上下のグリッドでさえも逆方向になり得るという問題に取り組んだ。そして非対角成分を考慮せず、対角成分のみで変換した方が予報精度が向上することを示した。小槻峻司 (理化学研究所計算科学研究センター) はNICAM-LETKFを用いて、衛星観測による鉛直水蒸気積分量を同化した。これによって雲物理過程におけるB1とよばれるパラメータの最適化を試み、最適化しない場合と比べて過剰なバイアスを減少させることに成功した。さらに全球一様のパラメータをモデルグリッドごとに求めるようにすることで、逆に過小となりすぎていた中高緯度の水蒸気量が観測に近づいた。従来、データ同化は変分法かアンサンブルカルマンフィルタで行われ、かつシミュレーションの最適な初期値を作成するために用いられてきたが、本セッションではこれらでは扱えない非線形に対応した粒子フィルタの発表が多く、また斬新なアイデアに基づく従来手法の改善や、データ同化によるシミュレーションモデルそのものの改良といった新しい研究も発表され、データ同化技術の発展を感じた。

(川畑拓矢)

### 2.5 物理過程1

本セッションでは物理過程のモデリングに関し、以下の5件の発表があった。Shian-Jiann Lin

(GFDL)は、従来の気象・気候モデルの実装では分離されていた力学過程と物理過程について、グレーゾーンを想定したモデルでは両者の相互作用(dynamics-physics coupling)をより適切に表現することが重要であることを指摘し、この問題意識に基づいてGFDLが開発が進められている‘Super Dynamics’と呼ばれる新しいモデルについて紹介した。北村祐二(気象研)は境界層のグレーゾーンのためのパラメタリゼーションの一つであるKitamura(2016)スキームにおける、逆勾配項の導入と長さスケールの見直しを含む改良について紹介した。気象庁の現業モデルasucaの水平解像度を125mから1000mまで変えてスキームの検証を行った結果、風速や気温の鉛直傾度が改善されることや水平シアの効果が無視できないことを示し、改良したスキームで境界層グレーゾーンを表現できることを説明した。Hugh Morrison(UCAR)は対流の上昇流の構造や発達状況に依存したエントレインメントやデトレインメント(周りの気塊の出入り)を多くの対流が領域内に入る高解像度モデルを用いて調べ、概念モデル化した。座長を務めたWojciech Grabowski(NCAR)は夏季の陸上の対流の高解像度再現実験を行い、気候変化に対する応答において力学過程と熱力学過程の効果を分離する解析手法を提案し、積雲の発達が下層の水蒸気量の変化に敏感であることを示した。大野知紀(海洋研究開発機構)は放射対流平衡にある大気についてNICAMを用いた数値実験結果から、海面水温が高層雲の雲量に及ぼす効果に対する鉛直解像度の影響について調査し、鉛直解像度に対する高層雲の雲量の変化が乱流混合と雲微物理との相互作用の違いで生じることを報告した。本セッションのタイトルでもわかるように、グレーゾーン問題への対応や雲解像モデルの精緻化に向けて、全球モデル等での物理過程の実装による効果や境界層スキームの開発、上昇流への影響や高層雲への適用・評価など、多くの切り口で研究・開発が進められており、今後の進展が注目される。

(北村祐二)

## 2.6 物理過程 2

「物理過程1」に引き続き、本セッションでは非静力学モデルの物理過程に関する4件の講演があった。招待講演ではTakanobu Yamaguchi(コロラド大学ボルダー校, NOAA)がE3SMモデルの鉛直高解像度化によって全球の下層雲のシミュレーションがどのように改善するのかを発表した。モデルの鉛直解像度を

8倍まで増やしたところ、大陸西岸に見られる下層雲過小評価バイアスが顕著に解消されることが分かった。彼らはまた、特定の物理過程において、特定の高度を選択的に鉛直高解像度化できる手法(Yamaguchi *et al.* 2017)を開発し、計算コストとモデル再現性の両立を可能とした。Woosub Roh(東大気海洋研)はCALIPSO衛星観測を用いた極域下層雲の評価手法とNICAMによる実験結果を紹介した。ライダーの偏光解消度を利用した粒子種判別手法(Yoshida *et al.* 2010)により、雲氷が雲底に多くみられる一方、雲頂は過冷却水滴に占められている鉛直構造を可視化した。またNICAMのシングルモーメント法雲微物理モデルは過冷却水滴を過小評価している一方、ダブルモーメント法雲微物理モデルは観測結果を良く再現することを示した。清水達也(海洋研究開発機構)は先のRohの講演で触れた、シングルモーメントバルク法雲微物理モデルの改良について紹介した。シングルモーメント法では中緯度を想定した高濃度の氷・雪・あられ診断法を採用しており、その結果として昇華成長および衝突成長速度を過大評価していたため、氷粒子の成長を抑えることで過冷却水滴を維持できることを示した。Zachary Lebo(ワイオミング大)はエアロゾルがスコールラインの構造や鉛直速度に与える影響について紹介した。様々な環境場において感度実験を行い、対流雲に与えるエアロゾルの力学的影響を包括的に評価した。本セッションを通じ、多岐にわたる物理過程という枠組みの中で、物理過程の評価や改良に関する取り組みが日米を通して多くないことが分かった。このことはモデルが成熟を迎えた結果であり、非静力学モデル利用者の門戸が広がったとみなせるのかもしれない。

(清水達也)

## 2.7 力学コア

本セッションでは力学コアをテーマに最初に2件の招待講演、その後3件の一般講演があった。Marat Khairoutdinov(米・ストーニーブルック大学)は雲解像非弾性モデルSAMを全球領域に拡張したモデルについて、標準的なベンチマーク試験の結果等を報告した。John McGregor(豪・CSIRO)は等角6面体格子上のセミインプリシット・セミラグランジュ(SISL)法大気モデル(CCAM)のUJ格子(各セルの面積が完全に一樣となる6面体上の格子配置)への拡張について報告した。UJ格子には時間積分にCCAM同様のSISL法を用いるモデルの他、スプ

リット・エクスプリシット法を用いるモデルも実装しており、両者の長短について議論した。三浦裕亮（東大）は平面6角形格子上の浅水方程式系において2つのB格子上の離散化を同期させることにより従前のZM格子モデルに見られた偽の計算モードを解消することに成功したMiura (2017) の手法を、球面上の正20面体格子に適用した結果を報告した。堀田大介（気象研）はSISL法に基づく全球スペクトルモデルにマルチグリッド法を将来適用することを目的として、球面調和変換にClenshaw-Curtis法を用いた南北方向に等間隔の格子配置を持つスペクトルモデルを実装した結果を紹介し、一般的なガウス格子を用いたモデルと積分結果がほぼ一致することを示した。最後に河野耕平（気象庁）は気象庁の新しい非静力学領域モデル asuca の開発経験から、定圧過程を仮定し等圧面上で定式化された物理過程の計算する加熱率を、定積過程を仮定し高度面上で定式化された力学過程が受け取る場合に生じる問題について議論した。

（堀田大介）

### 2.8 ポスターセッション

上記口頭発表の他に国内外から21件のポスター発表が、初日と2日目の夕方に講堂で行われた。ポスター発表に割り当てられた時間が終了しても議論が続き、講堂を閉める時刻までとても活発な情報共有や意見交換が行われた。

（瀬古 弘・和田章義・村田昭彦）

### 2.9 オープンセミナー

第1回の非静力学モデルワークショップが開催されてから20年の間、非静力学モデルは多くの科学的成果を創出し、また気象庁の現業モデルとして社会に貢献してきた。オープンセミナーでは国内における主要な非静力学予報モデルの中からメソスケールモデルとしてSCALE、全球モデルとしてNICAM、現業モデルとしてNHMや asuca を取り上げることとした。一般の方を対象にした話題として、予報精度向上に大きな役割を果たしてきたデータ同化を非静力学モデル開発に加え、最先端技術と社会貢献に関する話題提供という観点から次の講演者の方に講演をお願いした。はじめに斉藤和雄（東大大気海洋研）は気象庁の現業モデルとして利用されてきた非静力学モデルの開発の歴史を紹介した。次に西澤誠也（理化学研究所計算科学研究センター）はSCALEの開発及び高解像度シミュレーションから見えてきた可能性と課題を述べた。佐藤正樹（東大大気海洋研）はNICAMの開発と地球

全体を870mから数kmスケールで覆った実験により再現した組織化した対流や台風の全球雲解像シミュレーションの結果を紹介した。三好建正（理化学研究所計算科学研究センター）はデータ同化の基本的な解説から、SCALEやNICAMを使ったデータ同化研究の成果まで、基礎から最先端科学まで幅広く紹介した。藤田 匡（気象庁）は気象庁で運用しているメソ・局地数値予報システムの開発と現状課題を述べた。長谷川昌樹（気象庁）は「2030年に向けた数値予報技術開発重点計画」及び数値モデルの開発に関する最近の気象庁の取り組みについて紹介した。これらの講演はその内容が平易であったことからとても分かりやすく、数値モデルの研究を始めた方々にとっても非常に有益なものとなった。

（瀬古 弘・和田章義・村田昭彦）

### 3. おわりに

今回のワークショップは参加者が120名を超え、海外からも約20名参加し、盛況となった。ワークショップでは世界で取り組まれている非静力学モデルに関する多種多様かつ最先端の多くの研究を一度に俯瞰することができ、とても有益な会議となった。特にデータ同化システムとしての粒子フィルタのメソスケール実事例への適用、高分解能全球非静力学モデルの国内・国際比較実験、アンサンブル予報を用いた竜巻発生要因の解析など、実現がまだ先と思われていた開発・研究の発表が見られ、非静力学モデル分野の目覚ましい発展を実感することとなった。ワークショップではポスターセッションを含め、議論が活発に行われ、参加者間の情報共有や意見交換が十分に行われたと思う一方、会費は無料であることから多くの学生の参加を期待したものの、実際の参加数は期待していたほど伸びず、ワークショップ開催に関する事前の宣伝不足が課題として残った。2019年のワークショップは三重大学、2020年の国際ワークショップは京都大学で行う予定になっている。反省点については今後のワークショップ運営に活かせるよう、引き継ぎたい。

最後になりますが本ワークショップでは、東京大学大気海洋研究所佐藤正樹研究室、理化学研究所計算科学研究センターのデータ同化グループ、海洋研究開発機構のポスト「京」プロジェクト重点課題4から多くの海外研究者を招聘していただきました。またワークショップの開催にあたって、気象研究所企画室、会計課、予報、気候、台風、環境・応用気象研究部の関係

者の皆様，気象庁総務部総務課，国際室，予報部数値予報課の皆様，理化学研究所計算科学研究センター，気象業務支援センター，海洋研究開発機構，東京大学の多くの方に準備や運営で大変お世話になりました。ここに記して深く御礼申し上げます。

(瀬古 弘・和田章義・村田昭彦)

#### 略語一覧

asuca : Asuca is a System based on a Unified Concept for Atmosphere 気象庁非静力学モデル  
 BSISO : Boreal Summer Intra-Seasonal Oscillation 北半球夏季季節内振動  
 CALIPSO : The Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation  
 CCAM : Conformal Cubic Atmospheric Model 等角6面体大気モデル  
 CSIRO : Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization 豪州科学産業研究機構  
 GFDL : Geophysical Fluid Dynamics Laboratory 地球流体力学研究所  
 E3SM : Energy Exascale Earth System Model  
 FV3 : Finite-Volume Cubed-Sphere Dynamical Core  
 HWRF : Hurricane Weather Research and Forecasting model  
 LETKF : Local Ensemble Transform Kalman Filter 局所アンサンブル変換カルマンフィルタ  
 LES : Large Eddy Simulation ラージエディシミュレーション  
 NCAR : National Center for Atmospheric Research 米国大気研究センター  
 NICAM : Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model 非静力二十面体大気モデル  
 NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration 米国海洋大気庁  
 MJO : Madden-Julian oscillation 赤道季節内振動  
 MRI : Meteorological Research Institute 気象庁気象研究所

NHM : Non-Hydrostatic Model 気象庁非静力学モデル  
 SAM : System for Atmospheric Modelling  
 SCALE : Scalable Computing for Advanced Library and Environment  
 SISL : セミインプリシット・セミラグランジュ法  
 SMHI : Swedish Meteorological and Hydrological Institute スウェーデン気象水文研究所  
 UCAR : University Corporation for Atmospheric Research 大気研究大学連合  
 UJ : Uniform Jacobian 一様ヤコビアン  
 VVM : Vector Vorticity equation Model  
 WRF : Weather Research and Forecasting

#### 参考文献

Kitamura, Y., 2016: Improving a turbulence scheme for the terra incognita in a dry convective boundary layer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **94**, 491-506.  
 Miura, H., 2017: Coupling the hexagonal B1-grid and B2-grid to avoid a computational mode problem of the hexagonal ZM-grid. *SOLA*, **13**, 69-73.  
 里村雄彦, 竹見哲也, 野田 暁, 三好建正, 富田浩之, 斉藤和雄, 日下博幸, 重 尚一, 2011: 第1回非静力学数値モデルに関する国際ワークショップの報告. *天気*, **58**, 249-256.  
 Yamaguchi, T., G. Feingold and V.E. Larson, 2017: Framework for improvement by vertical enhancement: A simple approach to improve representation of low and high-level clouds in large-scale models. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **9**, 627-646.  
 Yoshida, R., H. Okamoto, Y. Hagihara and H. Ishimoto, 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.*, **115**, D00H32, doi:10.1029/2009JD012334.