

第3回非静力学モデルに関する国際ワークショップ・ 第6回全球雲解像モデリングワークショップの開催報告

富田 浩文*1・梶川 義幸*2・宮本 佳明*3・吉村 裕正*4
榎本 剛*5・北村 祐二*6・佐藤 陽祐*7
清木 達也*8・大塚 成徳*9・柳瀬 亘*10

1. はじめに

気象学会における非静力学数値モデル研究連絡会が主体となって国内で行われてきた非静力学モデルワークショップと、過去5回主に欧州で継続的に行われてきた国際全球雲解像モデリングワークショップが、理化学研究所計算科学研究機構 (AICS) の主催、気象学会、マックス・プランク気象学研究所、兵庫県立大学計算科学連携センターの共催で、2014年9月24日から26日にかけて AICS 構内において初めて合同で開催された。最終日である26日は午前のみで、2日半の開催であったが、世界中の著名な数値モデル研究者が一堂に会し、最新の研究結果やモデルの開発状況を報告するとあって、海外からの参加者21名を含む参加者の合計が100名を超える盛況な会議となった (第1図)。以下は、セッション毎に日本から参加した研究者による報告である。両ワークショップが、今後とも非静力学モデルの開発または利用を行っている国内外の研究者の有益な情報交換の場として、継続・発展していくこと期待する次第である。(富田浩文・梶川義幸)

2. 力学コア1

本セッションでは、非静力学全球モデル・領域モデルの力学コアに関連する研究成果について8件の発表が行われた。William Skamarock (米・NCAR) は、可変解像度の非静力学全球モデル (MPAS) を用いて一部の領域の解像度を上げた時 (例えば60 km → 15 km) の予報結果が良好であることを示した。Günther Zängl (独・DWD) は、20面体の非静力学モデル (ICON) の将来の現業化に向けた予報実験で、ICONは現在の現業全球モデル (GME) と比べて良い予報スコアが得られることを示した。John McGregor (オーストラリア・CSIRO) は、6面体格子で一様性の高い格子配置を採用しスプリットイクスプリット法を採用した全球モデル (VCAM) の紹介を行った。吉村裕正 (気象研) は、二重フーリエ級数を使用した非静力学全球モデルは球面調和関数のモデルと比べて高速に実行でき同等の実行結果が得られることを示し、また全対全通信の高速化のため多次元分割を行う方法を示した。Dupont Ricard (仏・Météo-France) は、非静力学領域スペクトルモデル (AROME) においてセミラグランジュ法の内挿計算時に空気塊の変形を考慮した重みを使用することにより降水が改善することを示した。河野耕平 (気象庁) は、気象庁の新しい力学コアを使用した非静力学モデルである ASUCA について紹介し、2 km の解像度で現在の現業領域モデル JMA-NHM と比較して降水予報について同等以上の結果が得られる例を示した。Jihyeon Jang (韓国・延世大) は、全球・領域統合モデルシステム (GRIMS) の領域スペクトルモデルと領域グリッドモデル (WRF) で物理過程を同等のものを使用して静力学と非静力学で予報テストを行い、非静力学モデル

*1 Hirofumi TOMITA, 理化学研究所.

*2 Yoshiyuki KAJIKAWA, 理化学研究所.

*3 (連絡責任著者) Yoshiaki MIYAMOTO, 理化学研究所. ymiyamoto@riken.jp

*4 Hiromasa YOSHIMURA, 気象研究所.

*5 Takeshi ENOMOTO, 京都大学.

*6 Yuji KITAMURA, 気象研究所.

*7 Yosuke SATO, 理化学研究所.

*8 Tatsuya SEIKI, 海洋研究開発機構.

*9 Shigenori OTSUKA, 理化学研究所.

*10 Wataru YANASE, 東京大学.



第1図 参加者の集合写真。

は静力学と比べて降水予報について良い結果が得られることを示した。西川雄輝（東大大気海洋研）は、 z 座標のフラックス形式のモデルで、なめらかな地形に合わせた薄い壁をグリッド間に置くことにより (thin-wall approximation), 階段状の山を使用する方法 (step mountain method) と違いなめらかな分布の山岳波が得られることを示した。（吉村裕正）

3. 力学コア2

このセッションでは、前セッションに引き続き、力学コアに関する4件の招待講演と1件の一般講演があった。Song-You Hong（延世大, KIAPS）は、個人的な見解としながら、全球モデル及び領域モデルの主流となる解像度での今後十年間の開発課題に関して議論した。全球モデルで使われると思われる10~1 kmでは、積雲対流が部分的にしか解像されない。そこで、積雲対流パラメタリゼーションが解像度に依存して弱まるようにした試みを紹介した。領域モデルでは、1 km~100 mが主流となると見られ、乱流パラメタリゼーションによる鉛直輸送と陽に解像するものとうまく組み合わせる必要があると述べた。また、アンサンブル予報に関し、物理過程よりも力学過程に摂動を与える方が摂動の成長が大きくなるという研究を紹介した。Francis X. Giraldo（米・NPS）は、並列化に適しており、精度の面でも有利な連続または不連続 Galerkin 法を採用し、CPUだけでなくGPUも利用したモデルを用いたシミュレーションについて紹

介した。Christiane Jablonowski（米・ミシガン大）は、局所的に解像度を高めた可変解像度大気大循環モデルが有効な気象・気候予測の有用な道具であるとした上で、立方体格子を採用したスペクトル要素法静力学モデルの可変解像度シミュレーションと動的に格子細分化が可能な非静力学モデルの開発状況について報告し、可変解像度における物理過程のパラメタリゼーションの課題について議論した。Anurag Dipankar（独・MPI-M）は、計算機の性能の向上とともに全球雲解像度モデルの解像度を高くしている日本のグループなどとは対照的に、0 (100 m) の格子の領域モデルの領域を広くしていくアプローチを取っていると述べ、今回はドイツを対象としたLES計算の結果を紹介した。榎本 剛（京大防災研）は、2013年度秋季大会 A312で提案した球面螺旋格子が他の準一様格子と比較して一様性に秀でていることを、エネルギーノルムや球面調和函数を要素とする内挿行列を用いて求めた重みを用いて示した。非弾性系と準静力学系との統合系に興味があるので、Ross Heikes（米・コロラド州立大）によるこの系を採用した二十面体モデルの発表を楽しみにしていたが、残念ながら講演はキャンセルだった。（榎本 剛）

4. 乱流

乱流のセッションでは、5件の講演があった。George H. Bryan（NCAR）は、台風中心部の微細構造をシミュレートするための手法について紹介した。

中心部ではLESを用いるのに十分な解像度とする一方で、格子間隔を中心部から離れるに従って広くとることにより、台風の構造を再現するのに必要な計算領域を確保していた。メソスケールモデルで用いられる境界層スキームとLESの乱流スキームを格子間隔に応じて切り替える必要があるため、その際に必要な工夫として、中心部に流入する流れに摂動を加える手法についての議論があった。杉山耕一郎 (ISAS/JAXA) からは、木星の雲層の鉛直構造を調べる目的で、雲対流を陽に表現する2次元モデルで数値実験を行った結果についての報告があった。NH₃、H₂O、NH₄SH からなる雲の鉛直分布は、従来の鉛直1次元の熱力学平衡に基づいた結果と異なること、対流活動は非定常ながら準周期的に生じることが示された。Guixing Chen (東北大) からは、海陸風に対する都市の影響を調べるために、仙台市を対象として3mの空間解像度で建物を陽に表現した数値シミュレーションについての報告があった。建物と海陸風との相互作用によって鉛直流の構造に変化が生じること、建物の存在により海風前線の進行がわずかに遅れることなどが示された。北村祐二 (気象研) は、乱流モデルで用いられる長さスケールの水平解像度依存性を調べるための手法について報告した。不安定境界層を例に、経験的に得られた乱流長さをDeardorffモデルに取り入れることにより、従来のDeardorffモデルが適用できないような粗い水平解像度であっても、解像度に応じた乱流が再現できることを示した。Peter Bogenschutz (NCAR) は、サブグリッドスケールの凝結や乱流を表現するモデルとして、部分的に3次のモーメントを考慮したスキームを雲解像モデルに適用した結果、海洋の層積雲の表現に改善が見られ、観測との対応が良くなることを示した。

本セッションで扱っている現象は多岐にわたっていたが、全体として、本ワークショップのテーマに沿う形で高解像度モデルを用いた取り組みが中心的な話題であった。数値モデルの高解像度化が可能になりつつある一方で、着目する現象に応じた数値モデリングの工夫も見られたように感じた。また、単なるモデルの高解像度化のみでは期待される精度が得られるわけではなく、解像度に応じた乱流モデルの高度化に向けた取り組みが必要との認識をあらためて持った。講演で紹介のあった個々のモデルは複雑化しているものの、講演時間が限られていることもあって、モデリング手法の詳細について議論をする余裕は十分にはなかった

ように思った。(北村祐二)

5. 雲物理 1

本ワークショップにおいて雲物理は2つのセッションに分けて行われた。雲物理1の前半は計算機の動向に関する発表、雲物理に関連するライブラリの発表が、雲物理1の後半と雲物理2のセッションでは従来の通り数値モデルを使った雲物理に関する発表が行われた。以下にそれぞれの発表の概略を述べる。

はじめに石川 裕 (理研 AICS) が国内外の大型計算機の動向とエクサスケールコンピュータの開発方針などについて報告した。数値ライブラリに関する発表として、Sylwester Arabas (ポーランド・ワルシャワ大) は雲エアロゾル相互作用の理解を目的にNCARとワルシャワ大学が共同で開発している雲微物理ライブラリに関する発表を、西澤誠也 (理研 AICS) がAICSで開発されている次世代気象・気候ライブラリ (SCALE) の紹介を行った。

次に佐藤陽祐 (理研 AICS) はSCALE-LESを用いて層積雲から積雲への遷移を再現したシミュレーションについて発表を行い、野田 暁 (JAMSTEC) は下層大気の特徴の違いによる洋上の下層雲の応答を調べた研究について紹介した。

Khairoutdinov (米・Stony Brook 大) は全球雲解像モデルでの使用を見据えた Super Parameterization の特性を、原 旅人 (気象庁) は2km解像度で気象シミュレーションにおける積雲パラメタリゼーションの必要性を主張した。以上のように雲物理1では主に計算科学的な発表と、下層雲、雲のパラメタリゼーションに関する発表が行われた。

本ワークショップにおいて雲物理のセッションに数値ライブラリの開発や計算機の動向など計算科学的な側面をもつ発表が組み込まれたことは興味深い。雲物理、化学過程、放射過程などの素過程コンポーネントの計算コストが高く、計算のボトルネックになっていることを考慮すると、今後の計算科学との連携が不可欠になる。そのような近年の動向をふまえて組み込まれたものだと考えられる。このような会議を機に計算科学と気象・気候学の連携がさらに進むことを期待したい。

また発表内容は雲物理2とあわせると雲微物理スキームやパラメタリゼーションの開発、それらの影響評価、雲微物理モデルの相互比較、対流雲、低層雲など多岐にわたっており、雲物理が気象・気候シミュ

レーションに与える影響の大きさと、その複雑さが垣間見えた。これらの多岐にわたる雲微物理に今後も幅広く取り組んでいくことが必要であると感じられた。

(佐藤陽祐)

6. 雲物理 2

このセッションでは非静力学数値モデルで用いられる雲物理過程の改良、評価、そしてGCM等のパラメタリゼーションで用いられている仮定の検証などが議論されていた。それぞれが特徴的な発表である為に、ここでは個別に研究内容を紹介したい。

Hugh Morrison (NCAR) は対流雲内における鉛直速度の鉛直分布を理論的に見積もる方法を提案していた。理論的解釈は鉛直一次元的な議論ながら、適切なスケージングや圧力擾乱の影響などを考慮に入れる事により数値計算で得られた鉛直速度の鉛直分布の再現に成功していた。この研究成果はGCMの積雲パラメタリゼーションに応用できる事を提案しており、今後の発展が期待される。清木達也 (JAMSTEC) はダブルモーメントバルク法雲微物理モデルを全球雲解像実験に適用し、領域実験や理想化実験で検証されてきた雲微物理モデルが全球実験でも有用である事を実証した。氷雲微物理 (特に落下過程と衝突過程) の精緻化によって巻雲の分布が現実的になり、長波放射フィードバックを通じて熱帯圏界面および全球の対流圏の高温バイアスが解消される事を説明した。一方で、日本ではゾンデ観測を用いた雲微物理モデルの検証が連綿と続けられており、橋本明弘 (気象研) は雲氷水濃度と雪数濃度の比率が氷雲微物理の検証に有用であることを紹介した。従来のJMA-NHM雲微物理モデルでは単分散の粒形分布関数を仮定していたが、観測で得られた粒形分布関数を基に粒形分布に広がりを持たせることで粒子成長 (特に衝突過程) に多様性が生まれ、シミュレーション結果が向上したようだ。島 伸一郎 (兵庫県立大) は超水滴法の特徴をいかり、低層雲における雲エアロゾル相互作用の理想化実験を行っていた。長期的な雲形成の維持にとっては、初期条件のエアロゾル濃度の疎密よりも持続的な供給量の多寡の方が重要であることを示した。これは逆説的に、雲形成にエアロゾルの影響が強く見られている地域において、エアロゾルエミッションの量を推定する事が可能であることを示している。雲物理のみならず、エアロゾルモデリングへの波及が期待される。中村晃三 (JAMSTEC) はKinematic Driver

(KiD; Shipway and Hill 2012) の枠組みを利用して、自身の数値実験結果 (RICO 事例) のバイアスの原因究明を行っていた。KiDは物理過程のモジュールを容易に交換できるようにウェブ上でドキュメントとパッケージが公開されている。次回以降のワークショップで、ホストの都市・地域に代表される雲物理現象を対象に、KiDを用いて相互比較実験を行うと面白そうである。

(清木達也)

7. データ同化

2日目の午後の第二セッションではデータ同化に関する講演が8件行われた。まず始めに、「ビッグデータ同化」関連の講演が行われた。三好建正 (理研 AICS) は大阪大とNICT神戸に設置された2台のフェーズドアレイ気象レーダ (PAWR) と次期静止気象衛星ひまわりを用いて30秒毎に100 m解像度の30分予報を行い、ゲリラ豪雨の予測を行うという構想を示した。PAWRデータを同化した初期成果も示し、対流セルの発達を良好に捕捉できていることが報告された。大塚成徳 (理研 AICS) はビッグデータ同化に向けて対流規模での予測誤差の時間発展を調べるためにブリーディング実験を行い、対流セル周辺にフィラメント状の誤差構造が見られることを報告した。大塚道子 (気象研) は新しい手法によって計算された静止衛星の大気追跡風を同化した結果を示し、改善が見られることを報告した。

続いて変分法とアンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) のハイブリッド同化に関する講演が3件行われた。幾田泰醇 (気象庁) は気象庁の次期非静力学モデルASUCAを用いた三次元変分法 (3DVar) とEnKFのハイブリッド同化について講演した。静的背景誤差共分散とアンサンブル誤差共分散の混合比率を変えた実験について示し、1:3が最適であると報告した。折口征二 (気象研) は気象庁非静力学モデル (JMA-NHM) を用いたハイブリッド同化について講演し、一点観測を同化する実験で3DVar、四次元変分法 (4DVar) の異なる手法での違いを議論した。伊藤耕介 (琉球大) はJMA-NHMを用いたハイブリッドEnKF-4DVarシステムを用いて台風の同化実験を行い、台風の渦構造を正しく反映したインクリメントが得られることを示した。いずれの講演でも従来の手法に比べ、流れ場を考慮したもっともらしい解析が出来ることとであった。

國井 勝（気象研／理研 AICS）は台風中心気圧・中心位置の観測情報（台風解析）を直接同化する手法について紹介し、従来手法に比べて気圧や位置の修正が自然になされることを示した。最後に小野耕介（気象庁）が気象庁におけるメソアンサンブル予報システムの開発について紹介し、特に、確率論的物理過程の導入が有効であると報告した。（大塚成徳）

8. 対流とサイクロン

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10件の発表があった。招待講演では Wojciech W. Grabowski (NCAR) が非弾性系と圧縮系のモデルを比較し、湿潤対流のシミュレーションでの違いは小さいことを確認した。斉藤和雄（気象研）は高解像度のメソ気象予報に関して、スーパーコンピュータ「京」を利用した最新の成果を紹介した。台風の再現実験の発表は3件あり、竹見哲也（京大防災研）は台風 Haiyan (2013年台風第30号) に関して、解像度や初期値・境界値に対する依存性と高潮のシミュレーションを紹介した。金田幸恵（名大地球水循環）は複数の初期値を用いた再現実験を行い、台風 Ida (1958年台風第22号, 狩野川台風) の構造と急発達の再現性との関係を示した。加藤雅也（名大地球水循環）は大気・海洋・波浪結合モデルを利用した感度実験を行い、台風 Soulik (2013年台風第7号) の発達における黒潮の影響を解析した。温暖化実験や理想化実験の発表では、様々なスケールの対流のメカニズムが紹介された。David S. Nolan (米・マイアミ大) は赤道 β 面モデルで水惑星実験を行い、CAPE に対する積雲対流の応答と ITCZ の構造との関係を議論した。佐藤正樹（東大大気海洋研）は全球雲解像モデルで温暖化実験を行い、積雲対流の質量フラックスについて台風の寄与の変化を評価した。余田成男（京大）は東西鉛直2次元モデルを用いて、対流圏の東西風の振動における対流の構造と運動量輸送を解析した。大野知紀（東大大気海洋研）は非静力学モデルの出力をバランス方程式に与え、台風の暖気核が対流圏上層で強まるプロセスを解析した。柳瀬 亘（東大大気海洋研）は熱帯・亜熱帯・温帯の平均場を与えた理想化実験を行い、低気圧の発達に影響する環境場の要因を評価した。結果の解釈に関する議論も活発になされ、現象のメカニズムの理解が深まるセッションとなった。（柳瀬 亘）

9. 感想とまとめ

今回は、過去に別々に開催していた2つの国際的な数値モデルに関するワークショップの合同開催であった。慣れない会議運営には戸惑うことも多くあり、関係者の皆様にもご迷惑をおかけしてしまったのだが、終了後に参加者の方々から労いの言葉をいただけたことがとても嬉しかった。特に理化学研究所の複合系気候科学チーム・データ同化研究チームの方々には、準備段階から会議当日まで多大なるご支援をいただいた。また、運営に関して非静力学モデルワークショップ実行委員、気象学会、兵庫県立大学の皆様方にお世話になった。最後に、海外からの参加者との会話から、空き時間に行いたい観光として人気があったのが、京都・大阪などの観光を抑えて、六甲山のハイキングであった。大気研究者はやはり自然が好きなのだと感じた一瞬であった。（宮本佳明）

略語一覧

3DVar : Three-dimensional Variational method 3次元変分法
 4DVar : Four-dimensional Variational method 4次元変分法
 AICS : Advanced Institute for Computational Science 理化学研究所計算科学研究機構
 AROME : Application of Research to Operations at Mesoscale model メソスケール研究現業適用モデル
 ASUCA : Asuca is a System based on a Unified Concept for Atmosphere アスカ
 CAPE : Convective Available Potential Energy 対流有効位置エネルギー
 CPU : Central Processing Unit 中央演算処理装置
 CSIRO : Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization オーストラリア連邦科学産業研究機構
 DWD : Deutscher Wetterdienst ドイツ気象局
 EnKF : Ensemble Kalman Filter アンサンブル・カルマンフィルタ
 GCM : General Circulation Model 大気大循環モデル
 GME : German Global Model ドイツ全球モデル
 GPU : Graphics Processing Unit 画像処理装置
 GRIMS : Global/Regional Integrated Model system 全球・領域統合モデルシステム
 ICON : ICOSahedral non-hydrostatic model 正20面体非静力学モデル
 ISAS : Institute of Space and Astronautical Science 宇宙科学研究所
 ITCZ : Intertropical Convergence Zone 熱帯収束帯

JAMSTEC : Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology 海洋研究開発機構
 JAXA : Japan Aerospace Exploration Agency 宇宙航空研究開発機構
 JMA-NHM : Japan Meteorological Agency Nonhydrostatic Model 気象庁非静力学モデル
 KIAPS : Korean Institute of Atmospheric Prediction Systems 韓国型数値予報モデル開発事業団
 KiD : Kinematic Driver 力学ドライバ
 LES : Large Eddy Simulation ラージ・エディ・シミュレーション
 MPAS : The Model for Prediction Across Scales ロスアラモス国立研究所と NCAR が共同開発している気候モデル
 MPI-M : Max-Planck-Institut für Meteorologie マックス・プランク気象学研究所
 NCAR : National Center for Atmospheric Research 米国大気研究センター

NICT : National Institute of Information and Communications Technology 情報通信研究機構
 NPS : Naval Postgraduate School 米国海軍大学院
 PAWR : Phased Array Weather Radar フェーズドアレイ気象レーダ
 SCALE : Scalable Computing for Advanced Library and Environment AICS で開発されている次世代気象・気候ライブラリ
 VCAM : Variable Cubic Atmospheric Model 可変正6面体大気モデル
 WRF : Weather Research and Forecasting model 天気研究予報モデル

参考文献

Shipway, B. J. and A. A. Hill, 2012: Diagnosis of systematic differences between multiple parametrizations of warm rain microphysics using a kinematic framework. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **138**, 2196-2211.