

第7回非静力学モデルに関するワークショップの報告*

新野 宏^{*1}・伊賀 啓太^{*2}・瀬古 弘^{*3}・吉崎 正憲^{*4}
 岩崎 俊樹^{*5}・斉藤 和雄^{*6}・里村 雄彦^{*7}

1. はじめに

2005年10月5日～6日に第7回非静力学モデルに関するワークショップ「非静力学数値モデルの現状と将来展望」(主催: 日本気象学会非静力学数値モデル研究連絡会・東京大学海洋研究所, 後援: 気象庁)が東京大学海洋研究所で開催された。

高精度非静力学モデルを利用した気象及び気候研究の推進・力学フレームの開発・物理過程パラメタリゼーションの開発に関する情報交換の場として始まった本ワークショップも7回目を数え, 毎年秋の行事としてすっかり定着した感がある。今回は, 東京大学海洋研究所の共同利用研究集会として開催されたこともあり, 気象学関係者だけでなく海洋物理学関係者にも参加を呼びかけたところ, 非静力学モデルを用いた大気・海洋結合モデルなどいくつかの興味深い話題提供をいただくことができた(2.1節)。

この1年のうちに気象庁では現業予報モデルJMANHM (Saito *et al.*, 2005)として非静力学モデルが運用され始め(2004年9月), モデルの性能が日々検証されるようになった(2.5節)。2006年3月にはモデルの水平分解能が5 kmへと更に高解像度化される予定であるという。気象庁だけでなく, いくつかの大学でも, MM5 (The Fifth-Generation NCAR/Penn

State Mesoscale Model; Grell *et al.*, 1994)やCRESS (Cloud Resolving Storm Simulator; 坪木・榊原, 2003)などを用いた予報が日々行われるようになってきている[†]。当然, 非静力学モデルに必要な様々な物理過程に関する信頼できるパラメタリゼーションが求められるようになってきている(2.5, 2.7節)。また, 雨・雪などの降水粒子や雲粒子を陽に扱うことができる非静力学モデルに適用可能な各種データの同化の研究が, より良い初期値の作成を求めて急速に進展しつつある(2.2節)。

厳しい検証を経て改良されたモデルは, 個々の事例の再現実験・理想化実験等, 様々な形で利用され, 現象の解析やメカニズムの理解を行う上で不可欠なツールとなりつつある(2.3, 2.4節)。また, 集中豪雨などの顕著現象は, アンサンブル予報等により見逃しがないように予知したいが, どのようなアンサンブル予報を行うのが良いのかについて, 様々な角度から研究が進められつつある(2.3節)。かつては夢であった積雲対流を(何とか)解像する全球非静力学モデルも, 地球シミュレータの出現を得て現実的になりつつあり, 様々なモデル開発が行われると共に, 興味深い成果が出つつある(2.6節)。

このように, この1年間で, 非静力学モデルとこれを用いた研究は大きく進展し, その応用範囲を着実に広げてきた。その成果を集めた今回のワークショップは, 初日76名, 2日目69名の参加を得て, 大変盛況であった。講演内容も非常に多彩で, 活発な議論が行われ, 大いに知的興味を満足させられる集会となった。以下では, 各セッションの座長に講演内容の概要を紹介

* Seventh Workshop on Non-hydrostatic Modeling.

^{*1} Hiroshi NIINO, 東京大学海洋研究所.

^{*2} Keita IGA, 東京大学海洋研究所.

^{*3} Hiromu SEKO, 気象研究所予報研究部.

^{*4} Masanori YOSHIKAZI, 気象研究所予報研究部.

^{*5} Toshiaki IWASAKI, 東北大学大学院理学研究科.

^{*6} Kazuo SAITO, 気象研究所予報研究部.

^{*7} Takehiko SATOMURA, 京都大学大学院理学研究科.

© 2005 日本気象学会

[†] 例えば, <http://net.cive.gifu-u.ac.jp/>; http://www.rain.ihas.nagoya-u.ac.jp/CRESS/fcst_exp.html; <http://www.hc.keio.ac.jp/earth/ssh/jpn/pdf/F.pdf> など.

介してもらうことにする。

なお、更に詳しい講演内容（1講演当り2ページ）は、pdfファイル化されたワークショップ予稿集が日本気象学会非静力学数値モデル研究連絡会のホームページ（<http://wind.geophys.tohoku.ac.jp/nonhydro/workshop/>）から入手できるので、参照いただきたい。

最後になったが、本ワークショップの準備にあたって、気象庁数値予報課の藤田 司予報官には大変お世話になった。深く御礼申し上げる。（新野 宏）

2. セッションの概要

2.1 海洋モデルと大気・海洋結合モデル

本ワークショップは、大気モデルの開発やそれを用いた研究の発表が中心であり、次セッション以降は全て大気モデルに関するものである。しかし、海洋においても、取り扱う現象やスケールによっては非静力学モデルを必要とするのは大気の場合と同様である。本セッションでは海洋のモデルあるいは大気・海洋結合モデルの開発・研究の発表が行われた。

まず相木（地球環境フロンティア研究センター）ほかは、成層流体中の等密度面を横切る方向の運動量輸送の一形態である「層厚形状抵抗」の定式化を行った。また、渦解像の全球海洋モデルの結果から層厚形状抵抗の大きさを見積り、風応力による海洋駆動と同じオーダーになりうることを示した。中低解像度のモデルで、渦による運動量輸送をパラメタライズする際には軽く扱えない効果であると言える。

続いて高橋（地球シミュレータセンター）ほかは、地球シミュレータセンターで開発している、Ying-Yang 格子を用いた非静力学の大気海洋結合モデルの概要と特徴を紹介し、またモデルによる計算結果例を示した。計算例としては、大気部分については、台風進路と強度予報を行った結果などが示され、海洋部分については、北太平洋の気候値を再現する計算結果などが示された。いずれにおいても妥当な結果が得られることが確認され、さらに高精度・高速化を目指している。

また石川・里村（京都大学）は、雲解像の3次元非静力学大気モデルに海洋混合層モデルを結合させたモデルを開発し、熱帯域の積雲対流やそれに伴う大気海洋相互作用に関する数値実験を行った。TOGA-COAREにおいて観測された下層で西風、中層で東風の背景場に個々の積雲を与えてこのモデルを時間積分

した結果、雲対流が階層構造に組織化されていく様子が再現できた。また降水域が西進する様子が示され、そのメカニズムとしては、東西風の鉛直シアが重要であると示唆された。（伊賀啓太）

2.2 データ同化

本セッションでは、JMANHMの変分法同化システムに実際の観測データを同化した結果や問題点が報告された。川畑（気象研究所）ほかは、積雲対流を陽に表す格子2kmの4次元変分法システム（NHM-4DVAR）に、空港ドップラーレーダの動径風やGPS可降水量、地上観測データを同化し、1999年7月の練馬豪雨を引き起こした対流の発生や発達の様相が再現できたことを示した。都市域の局地的豪雨を引き起こした対流の発生の様相は、現実の細かな収束や水蒸気量の分布を同化した初めての報告であり、興味深いものであった。本田（気象庁・数値予報課）は、簡略化した湿潤過程を組み込んだ4次元変分法システム（JNoVA）を2004年7月の福井豪雨に適用した。現業メソ数値予報システムでは9時間先までしか予報できなかった豪雨を、JNoVAで作成した初期値では12時間以上持続できたことが示された。更に湿潤過程を高度化するために雲物理過程を含むJMANHMの線形性を調査し、格子スケールの構造をもつ擾乱が急成長してしまう問題があることを明らかにした。最後に、西嶋・本田（気象庁・数値予報課）は、JNoVAを3次元変分法同化システムとして使い、地上データを同化した結果を報告した。気温と地上風を同化すると、冬季の雪雨判定や水平シアの位置の予報が向上し、特に温度分布が改善されることが示された。風の同化については、地上風の代表性が悪く、非等方性も考慮した方法を検討していることが報告された。これらのJNoVAの成果の報告から、非静力学モデルの4(3)次元同化システム用いた予報精度の向上が、すぐそこまで来ていることが感じられた。（瀬古 弘）

2.3 降水系

本セッションでは6つのトピックスを話してもらった。まず川島（北海道大学低温科学研究所）は寒冷前線降雨帯のコア-ギャップ構造の再現結果を示した。その成因は、主に鉛直シア流の不安定によるものであり、これまで言われてきた水平シアの不安定ではなかった。瀬古（気象研究所）ほかは大阪管区气象台との地方共同研究の成果を紹介した。大阪付近で見られた線状降水帯に注目して、その発達とまわりの環境を調べ、それがバック・アンド・サイド・ビルディングタイプ

であることを示した。橋本（地球科学技術総合推進機構）ほかは、融解層の近辺における乱流過程の混合距離の依存性などを調べ、雲凝結が増えるのは融解熱による冷却とそれによって励起される対流によることを示した。安永（海洋研究開発機構）は西部熱帯太平洋上で高度4.5-6 kmに頻繁に見られる層状性雲の生成について、鉛直シア等の役割を調べた。その結果、鉛直シアが強い時に高度5 km付近に層状性雲ができやすいということであった。日下（電力中央研究所）ほかは、WRF (Skamarock *et al.*, 2005) とMM5の比較解析を平成16年新潟・福島豪雨を例に行い、WRFの方がシャープな構造を再現することを示した。ほかにも関東地方におけるヒートアイランドやオゾン輸送の話題も紹介した。斉藤（気象研究所）ほかは、全球アンサンブル予報の領域モデルによるダウンスケール実験を行った。平成16年新潟・福島豪雨や台風の事例について、全球アンサンブルの摂動に対応するメソモデルの予報と、予報結果への境界条件の影響について論じた。

私が担当したセッションでは理論的なものから現業的なものまでと多岐にわたった独立した話題だと思っていた。ところが、ワークショップから帰って金田幸恵氏（地球科学技術総合推進機構）と雑談した時に、橋本氏と安永氏とは融解層にまつわる不安定成層という共通の話題ではないかという指摘を受けた。実際橋本氏の話は水と氷が共存すれば不安定成層ができるということであり、安永氏は観測から融解層付近に雲が多く見られるとのことである。もし不安定成層が相変化を通して対流圏中層であり得るのであれば、そこで雲の存在頻度が高くなっても不思議ではない。別の話題となるが、雲には10種雲形がありそれらは3つ（高層雲、中層雲、下層雲）の高度で代表されるといわれている。こうした存在は気象学の常識ではあるが、個人的にはつねづね中層雲の形成メカニズムやその存在頻度に対して疑問に思っていた。しかし、不安定成層が相変化を通して対流圏中層で起きるとなると、その疑問に対する答えが見えた気がして非常に嬉しくなった。奇しくも、金田、橋本、安永の3氏は気象研究所でRR2002というプロジェクトで地球温暖化問題に取り組んできた仲間である（安永氏は4月から海洋研究開発機構に移籍）。今後問題意識を発展させて、このような研究がさらに推進することを期待したい。

(吉崎正憲)

2.4 台風・低気圧

このセッションでは梅雨前線上のメソ低気圧と台風に関する3件の研究発表がなされた。山田（海洋研究開発機構）は2003年梅雨期に中国大陸上で発生した7つのメソ α 低気圧について、RANALを初期値・境界値とした水平格子間隔5 kmのCReSS Ver 2.1を用いた再現実験を行った。その結果18時間後の低気圧の位置は150 km程度のずれで再現され、降水量は観測の半分程度となった。また、モデルでは前線南側での降水が再現されなかったが、水平格子間隔1 kmのモデルを5 kmモデルの結果にネストして計算したところ、風上の山によって励起される対流が表現されるようになり、より現実的な降水が見られるようになった。

加藤（気象研究所）は日本海に入っても勢力を維持し、北海道に強風被害をもたらした台風0418号について、水平格子間隔5 kmの気象庁非静力学モデルを用いて調べた。台風の西側上空からは高渦位の領域が接近していたが、凝結熱を取り除いた感度実験においては、台風の勢力が12時間に20 hPaも衰え、絶対渦度も急激に減少したことから、その勢力維持には凝結熱の効果が重要であったことがわかった。絶対渦度の収支解析にもとづき、上空の高渦位領域の果たす役割についても考察があった。

沢田ほか（東北大学大学院理学系研究科）は理想化した台風の数値実験（水平格子間隔5 km）を用いて氷晶過程の有無が台風の発達や構造に及ぼす影響を調べた。warm rainだけにした実験との比較により、氷晶過程を考慮した実験では渦の発達が遅く、最終的な強度も弱くなること、また目の大きさと最大風速半径が小さくなることを示した。いくつかの感度実験の結果から、最大強度の低下は下層の水蒸気量の減少によって生じ、発達の遅れはcold poolの形成による下層の吹き込みの抑制によることが示唆された。（新野 宏）

2.5 現業モデル

このセッションでは気象庁の次期現業予報モデルに関する3件の報告があった。荒波（気象庁数値予報課）ほかによる最初の講演では、2006年3月から運用が計画されている次期モデルの概要が紹介された。水平解像度は現行の2倍（格子間隔が約5 km）で、放射、雲物理、積雲対流、境界層、陸面などのパラメタリゼーションスキームにも改良が施されている。注意報や警報などの防災情報作成支援を目的としているため、予報の実施回数は1日4回6時間毎から8回3時間毎に倍増される。ただし、予報時間は18時間から15時間に

短縮している。降水の検証によれば、現在運用中のモデル(格子間隔10 km)に比べ、強雨の頻度と予報精度を改善していることが確認された。大森(気象庁数値予報課)ほかは積雲対流パラメタリゼーションについて報告した。格子間隔5 kmは微妙な解像度である。積雲対流を直接表現するには解像度が不足しており、パラメタリゼーションするには細かすぎる。実用的な観点から、Kain-FritschスキームとGrellスキームの雲物理過程との併用による改善を図った。前者については降水形成過程や対流の発生条件・寿命などを調整して、降水頻度を現実に近づけ、予報精度が改善することを示した。後者においてはエントレインメント率を調整して、温位・比湿の変化率の鉛直プロファイルをKFスキームに近づけ、予報特性や精度が改善することを示した。原(気象庁数値予報課)は5 km化に向けた地表面・陸面過程の開発について報告した。現状ではJMANHMで予報された地上風や地上気温などの地上気象要素には日変化が十分表現されない。このため、粗度やwetness、熱容量などの地表面パラメータを更新し、地上物理量の診断法(モデルのレベルから実測レベルへの内挿)を見直して、夜間のバイアスを改善した。特に、中西・新野の協力を得てMellor-Yamadaのレベル3のクロージャースキームの導入にも取り組んでいる。(岩崎俊樹)

2.6 全球モデル

本セッションでは、全球非静力学モデルに関連した5件の講演があった。新しい全球モデルや雲解像モデルを用いた気候実験が研究対象になりつつあり、本ワークショップの間口が広がってきているという印象を受けた。

室井(気象研究所)は、立方体型全球非静力学モデルの開発についての講演を行った。将来の超高速計算機の出現により全球を高解像度でシミュレーションする研究は増加すると予想されるが、球面調和関数を用いるスペクトルモデルではルジャンドル変換のコストが膨大になり、並列計算機への適合性も良くない。等緯度経度座標系では極が特異点になり、格子間隔が非常に小さくなってしまふ。球面を立方体に投影するconformal cubicによるモデルを作成し、移流精度の確認、浅水波方程式系による基礎テストを行った後、非静力学モデルに拡張した。全球客観解析を初期値とした実データによるシミュレーションを実行しており、領域モデルとしての利用も容易であるなどのメリットがある。

彭(地球シミュレータセンター)は、Arakawa-C格子とA格子の特性を併せ持つマルチモーメント格子(Mグリッド)を紹介し、浅水波方程式の地衡風調節の分散関係を解析的に分析して高周波と低周波の両方で両格子の利点が生かされることを示した。さらに球面上のYin-Yangメッシュ上のMグリッドで数値解を計算して安定性と精度を調べ、概ね良好な結果を得たことを報告した。

佐藤(東京大学気候システム研究センター/地球環境フロンティア研究センター)らは、非静力学正20面体モデルNICAM(Satoh *et al.*, 2005)の開発の現状と今後の計画について講演した。水平3.5 kmの水惑星実験を行い、解像度依存性を調べるとともに、衛星データと比較した。積雲パラメタリゼーションを入れない実験では、熱帯の降水量は分解能が粗いと多くなる傾向がある。TRMMとの比較では3.5 kmでもモデルの方が雲頂高度が高く降水量が多い。現実的な海陸分布・地形を導入した実験も始めており、高解像度実験の準備も進めている。

那須野(地球環境フロンティア研究センター)らは、NICAMによる水惑星全球雲解像実験に見られた熱帯の大規模雲システムの再現性について講演した。赤道ケルビン波と結合した東進するスーパー雲クラスタ(SCC)が卓越し、このSCCは西進する雲クラスタCCから構成されている。CC中には複数の数十kmスケールのメソスケール雲システムMCが認められ、その組織化においてはコールドプールやダウンドラフトが重要な役割を担う。

三浦(地球環境フロンティア研究センター)らは、NICAMによる水惑星実験のうち、7 km分解能の実験について海面水温を2K上昇させた実験を追加し、温暖化想定実験を行った結果を報告した。温暖化時には、亜熱帯対流圏の下層・中層で相対湿度が増加し、赤道付近では雲頂高度が高くなる。アルベドは中高緯度では増加しており、CCSR/NIESの低解像度(T42)AGCMとは逆の結果が得られた。全球平均した雲量についても逆の傾向が得られており、この結果がモデルのフレームの違いによるのか解像度によるのかを今後の検討課題とした。(斉藤和雄)

2.7 境界層・山越え気流

このセッションでは計6件の発表があった。野田ほか(東北大学大学院理学研究科)はJMANHMとSCM(Single Column Model)を用い、非局所乱流クロージャと三角形確率密度関数を用いた部分凝結ス

キームが下層雲の再現性に与える影響を LES (Large Eddy Simulation) の結果と比較しながら論じた。これらのスキームの導入によって多かった雲量が減少して LES の結果に近づくこと、雲層での鉛直格子間隔は 100 m 以下である必要があることを示した。中西(防衛大学校)と新野(東京大学海洋研究所)は改良 Mellor-Yamada レベル 3 モデルの安定性を増すような変数の値の制限法を提案し、この方法を用いると SCM による放射霧の再現が顕著に改善されて LES の結果に近くなる事を報告した。また、3次元静力学モデルに組み込んで北海道周辺の夏に発生した移流霧の再現を試み、北海道太平洋側沿岸から千島列島付近の移流霧の定性的分布を再現する事ができたと報告した。田中・豊田(電力中央研究所)は3次元非静水圧モデル M-WIND を用い、九州地方で発生した孤立峰下流での豪雨を念頭に置いた地形性降水の数値実験結果を報告した。100 mm/h もの降水が計算されているにも関わらず積乱雲を思わせる対流セルがなさそうなこと、孤立峰風上側に乾燥大気計算においても風上側に向かう下降流が計算されて一般流との間に強い収束を作っている事などについて質問が出た。清野ほか(気象研究所)は JMANHM を用いてタリム盆地でのダスト発生事例の再現を試み、西風、天山山脈越えの北寄りのおろし風、東風の3つの風系がダスト巻き上がり時の基本的風系であると結論づけた。この内、天山山脈越えのおろし風には上層ジェット軸の接近が発生条件としている。田中(東京大学海洋研究所)ほかはブジネスク方程式系で水平格子間隔50 m と 20 m の乾燥 LES モデルを用い、塵旋風の発生機構を顕熱フラックスと基本場の水平風速との関係において調べた。主に鉛直渦度を塵旋風の指標として整理すると、基本場の

水平風が弱く顕熱フラックスが大きい場合、対流混合層が厚くなる午前遅くから午後にかけて塵旋風が起きやすい事を示した。余(東北大学大学院理学研究科)は直交直線座標を用いた格子間隔数 m のモデルの計算結果を紹介した。新宿御苑のクールアイランド効果を調べる観測の予備計算として行ったもので、家々の間を抜けて広がる冷気流の様子をアニメーションで示した。(里村雄彦)

参 考 文 献

- Grell, G., J. Dudhia and D. Stauffer, 1994: A description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR Tech. Note, (398), 138pp. (<http://www.mmm.ucar.edu/mm5/>も参照のこと)
- Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito and Y. Yamazaki, 2005: The operational JMA Nonhydrostatic Mesoscale Model, Mon. Wea. Rev. (in press)
- Satoh, M., H. Tomita, H. Miura, S. Iga and T. Nasuno, 2005: Development of a global cloud resolving model—a multi-scale structure of tropical convections—, J. Earth Simulator, 3, 11-19.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang and J. G. Powers, 2005: A description of the Advanced Research WRF Version 2, NCAR Tech. Note, (468), 88pp. (<http://www.wrf-model.org/index.php>も参照のこと)
- 坪木和久, 榊原篤志, 2003: CReSS ユーザーズガイド第2版, 213pp. (<http://cf.tokyo.rist.or.jp/CReSS.top.html>も参照のこと)