

第5回非静力学モデルに関するワークショップの報告*

佐藤正樹^{*1}・岩崎俊樹^{*2}・安永数明^{*3}
榎本剛^{*4}・本田有機^{*5}・竹見哲也^{*6}

1. はじめに

非静力学数値モデル研究連絡会(略称「非静力2000」)では、2003年11月25日～26日の2日間にわたり、標記のワークショップを開催した。「非静力2000」では、非静力学モデルの開発や利用、基礎から応用までを含む幅広いテーマを議論の対象として毎年ワークショップを開催している。今回は、地球フロンティアの共催、気象庁の後援のもとで、海洋科学技術センター三好記念講堂(横浜新杉田)でワークショップを行った。

今回は29の発表、約90名の参加者があり、2日間フルに講演発表を設けることになった。特に、初日の午後は今回のワークショップの中心テーマとして「雲物理・積雲パラメタリゼーション」のセッションを設けた。この中で特別講演を気象研究所の村上正隆氏にお願いし、非静力学モデルにおける雲物理過程についてレビュー講演をしていただいた。雲物理過程の研究が人工降雨問題とともに発展した歴史の深い分野であること、氷の生成過程などまだまだ未解明の問題が多いこと、エアロゾルとの関係で環境問題において中心的な役割を果たしているという話題が紹介され、非常に今日的的確な講演であった。

非静力学のワークショップで「積雲パラメタリゼー

* Fifth workshop on Non-hydrostatic Modeling.

^{*1} Masaki SATOH, 地球フロンティア研究システム/埼玉工業大学.

^{*2} Toshiaki IWASAKI, 東北大学大学院理学研究科.

^{*3} Kazuaki YASUNAGA, 気象研究所/地球科学技術総合推進機構(AESTO).

^{*4} Tsuyoshi ENOMOTO, 地球フロンティア研究システム.

^{*5} Yuki HONDA, 気象庁数値予報課.

^{*6} Tetsuya TAKEMI, 大阪大学工学研究科.

© 2004 日本気象学会

ション」をテーマに設けることに関して疑問をもつ方もおられると思うので、趣旨説明を引用して説明を加えておきたい:「気象庁や地球フロンティアでは10 km 格子での非静力学モデルの開発・運用が予定されている。10 km 格子モデルでは、積雲をあらわに分解できないので、積雲をパラメタライズする必要性が指摘されている。このようなモデルでは、大気大循環モデル(GCM: General Circulation Model)で用いられている積雲スキームではなく、メソモデル用のKain-Fritschなどのスキームが使われる傾向がある。一方、非静力学モデルを、GCMで使われる積雲パラメタリゼーションの妥当性の検証のために使うという方向性や、非静力学モデルを用いた super parameterization という話題も最近ホットになっている。また、非静力学モデルで格子間隔がいくらより小さいと積雲パラメタリゼーションが必要ないかということも依然重要な問題である。積雲パラメタリゼーションは、雲物理過程、境界層過程などと分けて考えることはできず、このような他の物理過程との関連も議論していく必要がある。以上のように、非静力学モデルと積雲パラメタリゼーションとの関連性は少なくない。」大森、石田(気象庁数値予報課)によるKain-Fritschスキームの利用例の報告、村田(気象研究所)によるArakawa-Schubert型のパラメタリゼーションの非静力学モデルによる検討はこの趣旨に沿った講演である。また、榎本(地球フロンティア)の紹介したEmanuelスキームは、10~100 mスケールのドラフトを念頭において構築されているので、GCMだけでなく非静力学モデルにおいても利用できる可能性があることが印象的であった。趣旨に賛同して発表して頂いた方々に謝意を表したい。

ワークショップでは4つのセッションを設けた。各

セッションの内容を座長から報告する。

(佐藤正樹)

2. セッション概要

セッション1：計算手法・基礎実験

本セッションでは、非静力学モデルの開発、計算効率化、投影法やネスティングなどの計算手法に関して7つの発表があった。その内5つは、気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)の発表であり、残りの2つは、他の非静力学モデルの発表であった。日本では、非静力学モデル開発を行っているグループが幾つかあり、今回のように、開発にあたっての問題や解決への工夫、様々な計算手法などについて情報を交換できたことは、非常に有意義であった。

荒波(気象庁数値予報課)は、JMA-NHMに実装した2次元分割法の概要について報告した。実装した2次元分割法は、従来の1次元分割法に比べて、ベクトル型の計算機では必ずしも有利とは言えないが、スカラ型や並列計算機では並列化効率の向上に伴い、計算効率も改善することが示された。斉藤(気象庁数値予報課)からは、JMA-NHMの時間積分における浮力の扱いと連続の式における水蒸気拡散の考慮について発表があった。従来のJMA-NHMでは、水平陽・鉛直陰解法(HE-VI法)を用いた時には温度摂動から浮力を計算していたが、密度摂動から直接求めるようにすることで、領域平均気圧の異常な増加が抑えられることが示された。また側面での質量フラックスの調整量を少なくする手法として、連続の式において水蒸気拡散を考慮することが提案された。余(東北大学)からは、デカルト座標系での高解像度大気モデルの開発についての発表があった。開発中の非静力学モデルに導入した、急峻な地形や複雑な物体を正確に取り扱うための数値的手法(ステップマウンテン)の有効性が、幾つかのテスト実験を通じて示された。田中(気象庁数値予報課)は、JMA-NHMの予報の結果を、現業の気象庁静力学モデル(MSM)と比較した。JMA-NHMは、強風の予報精度はMSMよりも劣るが、弱風や強雨に関してはMSMよりも優れていることを示した。富田(地球フロンティア)は、全球雲解像モデルNICAM(Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model)の開発現状について発表を行った。現在、NICAMの力学コアは完成しており、傾圧波の発達実験で、そのパフォーマンスが示された。また放射や乱流、雲微物理などの物理過程の開発とテストを効率的

に行なうために、集中格子の導入が議論された。山崎(AESTO)からは、JMA-NHMへの円筒正距投影法の実装についての発表があった。これまで実装されていた投影法と比較検証して、矛盾のない結果が得られており、実装がうまくいっていることが示された。安永(AESTO)は、スペクトル境界(SBC:Spectral Boundary Coupling)法を導入したJMA-NHMの長期積分時における性能に関して発表した。通常の物理空間だけでなく波数空間においてもネスティングをおこなうSBC法を用いることで、高解像度の非静力学モデルにおいて長時間積分時の精度が向上することを示した。(安永数明)

セッション2：雲物理・積雲パラメタリゼーション

現在の雲解像モデルは、雲の内部のプロセスまで陽に表現するものではないので、雲物理に関してはパラメタ化する必要がある。村上正隆氏(気象研究所)が特別講演で指摘したように観測によって多くのことが明らかになりつつあるが、まだ定性的にも不明なことが多い。橋本(AESTO)が行った三陸沖の下層雲の再現性についての2モーメントの雲物理スキーム(混合比に加えて数濃度を予報)と従来のスキームとの比較や佐藤(埼玉工業大学/地球フロンティア)による放射対流平衡計算におけるバルク係数及び雲物理過程依存性の調査等、提案されているスキームが現実的や理想的な条件でどのようにふるまうか調べておくことは有意義である。同時に、久芳(地球フロンティア)による雲粒の発生までの微小液滴の凝結成長をパーセル法、雲粒の凝結成長、併合成長及び重力落下をピン法で計算するハイブリットスキームのような斬新なパラメタ化の試みを観測的研究と連携しながら行っていくことが必要であると感じた。他方、静力学平衡を仮定しないモデルにおいても積雲対流のパラメタ化は実用的な解像度では依然必要である。大森(気象庁数値予報課)や石田(気象庁数値予報課)が行った豪雨を再現するためのパラメタ調節や湿潤対流調節、Kain-Fritschスキーム、積雲パラメタリゼーションなしの比較のような研究は大変有意義な情報であるが、村田(気象研究所)が積雲の側面でのデトレインメントをArakawa-Schubert型のパラメタリゼーションに取り入れる際に行なったように雲解像モデルのシミュレーションをパラメタ化の改善に利用することは有効な手法であり今後進めていく必要があると感じた。榎本(地球フロンティア)はEmanuelスキームで蒸発を

受ける雨の割合を水平風の鉛直シヤーに依存させることを試みているが、その妥当性も雲解像モデルによる「答」によりある程度評価できると感じた。

(榎本 剛)

セッション3：物理過程（乱流、重力波、地表面）、データ同化

本セッションは、物理過程5件とデータ同化2件という2つの柱で構成されていた。高解像度モデルによる精緻なシミュレーションが、乱流や重力波のような細かいスケールの現象の理解を深めるのに役に立つことが改めて示された。その一方で、高解像度化だけでなく物理過程の精緻化が予報の改善につながることも示唆された。初期値に関しても、非静力学モデルに適した同化手法の開発が進み、今後のメソスケールの気象研究での非静力学モデルの利用がより期待される。

沢田（東北大学大学院）ほかは、非静力圧縮モデルを用いた3次元高解像度シミュレーションにより、重力流の発達メカニズムを調べ、クレフトと異なりロープは上昇流域の背後の下降流域が強く、温度構造に違いが見られることを示した。飯塚（産業技術総合研究所）ほかは、LES（Large Eddy Simulation：ラージエディシミュレーション）を用いて、山岳地形のCO₂輸送について解析した。大気が中立の時よりも不安定な時のほうが、山後方で循環流域が小さくなるのが下層付近のCO₂濃度の分布に影響を与えることを示した。熊谷（気象庁）ほかは、JMA-NHMの地表面過程にLouisらの方法を導入し、また気孔抵抗も考慮することで、地上温度の予測が改善されることを示した。引き続き、地上付近が湿りすぎる問題に対処するために、熊谷ほかは、non-local 境界層スキームの導入についての報告を行った。堀之内（京都大学宇宙電波科学センター）は、積雲対流により発生する重力波のシミュレーションをARPS（Advanced Regional Prediction System）で行い、中間圏界面付近での碎波に伴う擾乱パターンの生成メカニズムを明らかにした。西嶋（気象庁数値予報課）ほかは、3次元変分法解析システム（JNoVA0：JMA Nonhydrostatic Model Variational Assimilation）を用いた相対湿度の観測データの同化が、解析・予報に与える影響を報告した。本田（気象庁数値予報課）ほかは、JMA-NHMに基づいた4次元変分法解析システム（JNoVA）の開発状況について報告し、簡単なウィンドプロファイラーの風データの同化実験の結果を示し

た。

(本田有機)

セッション4：応用

本セッションでは、メソ降水系の組織化や環境場に対する感度、積雲の日変化、領域気候、海洋循環について非静力学モデルによって数値実験をした成果の発表があった。使用された数値モデルは、WRF（Weather Research and Forecast Model）、ARPS、JMA-NHM、MM5（Mesoscale Model Version 5）、RAMS（Regional Atmospheric Modeling System）といったコミュニティモデルから発表者が独自に開発したモデルに至るまで実に多彩であり、発表件数の分だけのモデルが利用されていたのが印象的であった。

竹見（大阪大学）は、中緯度スコールラインの湿度プロファイルに対する依存性を多数の数値実験により調べ、境界層だけでなく中層の湿度も重要であることを示した。山岬（地球フロンティア）は、GCSS-WG1（GEWEX Cloud System Studies working group 1）で対象となったTOGA COARE（Tropical Ocean Global Atmosphere Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment）領域でのスコールラインを例に、初期擾乱や環境場に対する感度を調べた結果を報告し、より良いモデルの開発のためにはモデル間の比較実験をさらに行う必要があると指摘した。野田（東北大学）と新野（東京大学）は、スーパーセル型竜巻の形成の力学過程を高分解能計算により調べ、ガストフロントに沿った強い鉛直渦がメソサイクロンと結合することによって竜巻が発生するという考え方を提案した。那須野（地球フロンティア）は、GCSS-WG4で議論されているアマゾンの積雲対流を対象とし、その日変化の再現性の鉛直格子分解能に対する依存性について報告した。塩本と里村（京都大学）は、前線通過時の降水の地形による影響について調べ、吉兼（地球フロンティア）ほかは領域モデルの地域気候への応用という立場から冬季日本海沿岸での降水の再現性について調べた。相木（地球フロンティア）ほかは、非静力全球海洋モデルの開発の現状を報告し、極の位置を任意に設定することで分解能を局地的に高くし、海峡といった狭い海域での流れの再現性が良くなることを示した。以上のように、非静力学モデルがこの分野における重要な研究ツールとなっていることが実感できたセッションであった。（竹見哲也）

3. 総合討論および結語

総合討論では、非静力学モデルにおける物理過程、特に乱流過程、浅い積雲対流過程、雲物理過程についての質問があった。水平数 km 格子のモデルにおける乱流モデルとしては、LES に基づいた乱流モデルより Mellor and Yamada のようなアンサンブル平均モデルの方がより適当ではないかというコメントがあった。また、雲物理過程には、水物質の種類数、ビン法 vs バルク法、変換項の表式などにさまざまな複雑性があり、一般的な優劣の結論を得るのは困難である。目的に応じたスキームの使い分けと、さまざまなスキームを用いた結果の比較の必要性が指摘された。水平格子間隔を 1 km 格子としても、浅い積雲およびその放射との相互作用はサブグリッドスケールの現象であり、何らかのパラメタリゼーションが必要である。数 100 m 分解能のモデルで、湿潤 LES のような計算を今後進めていく必要があるだろう。

「非静力学2000」では、共有非静力学モデルの構築と利用の普及を掲げてグループ作りを行ってきた。共有モデルとして、JMA-NHM を大学など外部研究機関にも利用できるような枠組みづくりを目指してきた。気象庁が提供されている「数値予報研究開発プラットフォーム」はその1つの成果である。これまでの非静力学モデルに関するワークショップでは、JMA-NHM の開発の紹介と、このモデルを利用した研究成果の発表が多かったが、今回のワークショップでは、

JMA-NHM 関連の発表をひとつの柱としつつ、他のさまざまな非静力学モデルの利用者・開発者の参加を奨励した。実際、RAMS や ARPS など外国の非静力学モデルを利用している研究者も多く、また日本国内でもいくつかの非静力学モデルがさまざまな機関/研究者によって開発されている。このような状況で、今後はモデルを1つに限定するのではなく、さまざまなモデルが共立して、各モデルの知見を交換することがより有意義であろう。物理過程などのスキームをモデル間で交換できるようになるだけでなく、力学コアさえもがパーツの1つとして利用可能となる状況が望ましいと思われる。これからは、JMA-NHM のプラットフォームなどを通じて、初心者にも非静力学モデルでの研究を容易にはじめられる環境づくりをすすめることと、いろいろな非静力学モデルの知見を交換できる場を提供することが求められていると考えられる。今後も、年1回程度、ワークショップを開催したいと考える(2004年は11月25・26日に松島での開催を予定)。非静力学モデル研究者の幅広い分野からの参加を期待したい。

最後に、多忙の中特別講演をお引き受けいただいた村上氏、会場運営に協力いただいた地球フロンティアのスタッフ・研究者の皆さん、わざわざ横浜まで足を運んでくださった全ての参加者の方々に感謝します。

(佐藤正樹)