

第5回非静力学モデリング短期数値予報

国際ワークショップ参加報告*

加藤 輝之^{*1}・熊谷 幸浩^{*2}・佐藤 正樹^{*3}・富田 浩文^{*4}
余 偉明^{*5}・本田 有機^{*6}・安永 数明^{*7}

1. はじめに

非静力学モデリングに関する短期数値気象予報モデルの国際ワークショップはヨーロッパでの非静力学モデル開発のリードセンターの役割を持つドイツ気象局が隔年で開催している会議で、今回が5回目に当たった(1回目から4回目までの同ワークショップの報告はそれぞれ Steppeler (1997), 栗原ほか (1998), 斉藤ほか (2000), 室井ほか (2002) にあるので参考にして欲しい)。3回目まではドイツ気象局があるフランクフルトの衛星都市であるオッフェンバッファで行われたが、今回は前回同様、バッドオルブという日本語の観光ガイドどころか地図にも表示されていない保養地(フランクフルトから電車で約1時間、バスに乗り換えて15分)にある公園の講堂で開催された。開催期間は2003年10月27日から29日の3日間で、時間がまるで小川のようにゆっくりと流れるような環境下、会議自体もそのような雰囲気が漂っていた。参加者は15か国から約80人で、地元ドイツからが半数以上ではあったが、隣国のスイス、チェコ、デンマーク、スロバキア、フランスの他、アメリカ、イギリス、イタリア、エスト

ニア、カナダ、スウェーデン、フィンランド、ロシアおよび日本からの7名の参加があった(第1図)。前回は米国のテロ事件の関係でかなりの発表がキャンセルされたが、今回は全ての口頭発表(34件)が予定通り行われた。各発表の持ち時間が20分間あり、活発な質疑応答・意見交換がなされた。口頭発表以外にも10数件のポスター発表があり、休憩時間を利用して全てをゆっくりと見る事ができた。

本ワークショップでは毎回テーマを設けていて、今回のテーマは「パラメタリゼーション」であった。その中で、大気境界層、対流についてのパラメタリゼーションに関する発表が会議初日の大半をかけて行われた。その後、非静力学モデルシステム、力学と数値解法、データ同化、事例解析と精度評価についての発表があり、最終日には非静力学モデルの評価方法、高分解能モデルでの対流の取り扱い、数値積分法における2タイムレベル、モデルのソースレベルでの共有化についての4つの分科会に分かれて活発な議論が行われた。(加藤輝之)

2. 各セッションの概要

2.1 パラメタリゼーション (土壌モデル)

まず、熊谷(気象庁数値予報課)が気象庁非静力学モデル(JMANHM)の地表面過程の改善について発表を行った。過多だった地表面の潜熱フラックスを減少させ、過小だった大気下層の乱流拡散係数を増加させることにより、JMANHMに存在した地表面過程の問題点を解消したことを報告した。続いて、Schlünzen(ドイツ、ハンブルグ大学)がモデル格子で表現できない(sub grid)スケールの土地利用情報の扱い方が予報に与える影響について発表した。ある格子のフラックスを算出する際、その格子を代表する粗度長を先に求めて、その粗度長を用いてフラックスを計算する方法

* Report on the Fifth International SRNWP (Short-Range Numerical Weather Prediction) Workshop on Nonhydrostatic Modelling.

^{*1} Teruyuki KATO, 気象研究所予報研究部.

^{*2} Yukihiko KUMAGAI, 気象庁予報部数値予報課.

^{*3} Masaki SATOH, 埼玉工業大学/地球フロンティア研究システム.

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

^{*5} Weiming SHA, 東北大学大学院理学研究科.

^{*6} Yuki HONDA, 気象庁予報部数値予報課.

^{*7} Kazuaki YASUNAGA, 地球科学技術総合推進機構.



第1図 会議の参加者の集合写真. 前方左側の車椅子に乗られている方がNCEPのJanjic氏.

(parameter averaging method) とそれぞれの土地利用情報に対応する粗度長からフラックスを計算し、そのフラックスを平均して全体のフラックスとする方法 (flux aggregation method) の2種類が考えられるが、flux aggregation methodの方が温度や露点温度の予報結果が良いことを示した。続いて、Heinemann (ドイツ、ボン大学) が地表面の不均質性の扱いについて発表した。フラックスを計算する際には乱流によるフラックスだけでなく、乱流よりは大きい sub grid スケールの揺らぎによるフラックスを考慮するべきであり、後者の考慮は4 km より大きな格子間隔の場合に重要であるとしていた。続いて、Mironov (DWD) が湖面の温度を予測する数値モデルについて発表した。雪や水や湖底の堆積物を考慮したモデルであり、鉛直1次元の実験では良い結果を示していた。天気予報モデルに組み込んで、3次元的な評価を行う予定だそうである。(熊谷幸浩)

2.2 パラメタリゼーション (感度実験)

非静力学モデルは別名、雲解像モデルとも呼ばれるが、降水をもたらすような個々の雲を解像するには最低でも水平解像度1 kmが必要だと言われている。それより粗い解像度では対流システムを表現するには何らかの工夫 (パラメタリゼーション) を必要とする。対流のパラメタリゼーションについては次のセッションで具体的な議論がなされたが、このセッションでは対流のパラメタリゼーションを取り替えたときの感度実験を中心とした講演が3件行われた。先ず、Jones

(スウェーデン水文気象研究所) がHIRLAMの鉛直1次元スキームを用いて、大気境界層トップの層積雲の再現における問題点を議論した。続いて、Reinhardt (ドイツ国立ウェグナー研究所) が氷晶の形状、大きさ、数密度で記述されるパルクパラメタリゼーションのインパクトについて議論し、LMを用いた感度実験について発表した。セッションの最後に、Sattler (デンマーク気象研究所) がHIRLAMを用いて、5つの降水スキームをメンバーとしたメソアンサンプル予報を試みた結果について発表した。(加藤輝之)

2.3 パラメタリゼーション (対流)

非静力学モデルによる対流の計算についての3件の発表の後、乱流、山岳、地表面の発表が1件ずつあった。Niemela (フィンランド、ヘルシンキ大学) はHIRLAMの静力学版と非静力学版を用いて、特に3-11 km格子間隔での分解能の違いによる対流の表現の違いを調べた。Hallwell (旧姓 Roadnight; 英国、UKMO/レディング大学) はGregory-Rowntreeのパラメタリゼーション (Gregory and Rowntree, 1990) の評価を行うために、UKMOの非静力学モデルを用いて放射対流平衡実験において1 km格子で対流を陽に分解した結果と10 km格子でGregory-Rowntreeを用いた結果を比べた。佐藤 (埼玉工業大学/地球フロンティア) は開発中の全球非静力学モデルの概要を紹介した後、同じく放射対流平衡実験の結果を示し、広領域でのレジームの多様性、雲物理による水蒸気分布の依存性を論じた。Helmert (IfT) はLMを用いて混

合距離の選択のインパクトを調べた。Knuth (IfT) はステップ型の座標で山岳の効果を導入する方法について紹介した。cut cell 手法により非弾性系の方程式を陰的に解く。最後に、Raschendorfer (DWD) は orography following boundary layer approximation (OGA) の概念を提唱し、樹木やビルがある場合の地表面フラックスにおける粗度の表現方法について検討した。積雲パラメタリゼーションの話題は Roadnight だけであり、このワークショップのコミュニティーでは積雲パラメタリゼーションについての興味は薄いものであるという印象をもった。予定されていた Craig らの確率的な Kain-Fritsch スキームのポスター発表がキャンセルされたのが残念であった。(佐藤正樹)

2.4 非静力学システム

このセッションでは、4つの発表が行われた。まず、Janjic (NCEP) からこれまで NCEP で使われていた Meso-Eta モデルの後継にあたる非静力版の NMM (NCEP メソモデル) の概要についての発表があった。これは WRF プロジェクトの協力のもと開発されているモデルで、力学フレームに以下の特徴をもつ。鉛直方向の慣性項を除いた静力学部分と鉛直方向の慣性項の部分に分けて解く。非静力学部分はソースとしてモジュール化して追加する形にあるので非静力効果の検証が容易になる。物理過程のパッケージは Meso-Eta モデルのものを改良しながら使うことになるが、山岳の取扱 (Meso-Eta では z 座標、NMM では z^* 座標) の違いのため、いくつかは再定式化の必要があるとのことであった。また、Klemp (NCAR) からはどの解像度で対流システムが再現可能かをテーマに WRF モデルを使って、広領域 (2000 km 平方) を使った 10 km 格子と 4 km 格子の計算結果について短期予報を行った結果について報告があった。BAMEX (Bow echo And Mesoscale convective vortex EXperiment) のデータと比較検証を行い、スコールライン、サイクロン等いくつかのイベントについて解像度よっての振舞いを検証していた。4 km の対流直接計算の結果は 10 km で積雲パラメタリゼーションした結果に比べて、降水のパターンおよびタイミングがしっかりと再現されていた。Malarde (フランス気象局) からは 2008 年までに開発を予定している Arome プロジェクトの紹介があった。3 km 以下の超解像度で、リアルタイムでのラージスケールモデルとのカップリングや高解像度の観測データを使ったデータ同化システムの構築を目指

す。力学フレームワークは Aladin-NH モデルと同様で Semi-Implicit Semi-Lagrangian スキーム、物理過程はフランスのコミュニティーモデル Meso-NH のものを参考にしながら実装する予定であるとのことである。続いて、富田 (地球フロンティア) が正二十面体を使った全球雲解像モデル NICAM の開発についての発表を行った。力学コアのパフォーマンスを示すとともに、物理過程について現在の開発状況と今後の開発戦略についての説明を行った。(富田浩文)

2.5 力学と数値解法

このセッションでは、8つの発表が行われた。Tolstykh (ロシア科学アカデミー) が開発中の渦度・発散方程式系の全球モデルを紹介した後、水平分解能による感度実験の計算結果を報告した。フランス気象局が中心となってヨーロッパで開発されている非静力学モデル Aladin-NH に関して、3つの発表があった。最初には Brozakova (チェコ水文気象研究所) が Aladin-NH モデルに Semi-Lagrangian スキームを導入したことを発表した。またそれによってモデルの精度と効率について考察も行った。Benard (フランス気象局) が同じく Aladin-NH モデルに Semi-Implicit スキームを取り入れることを試み、中間テストの結果を示した。Vivoda (スロヴァキア水文気象研究所) が Semi-Implicit スキームを実装した Aladin-NH を用いて実例計算を行ったことで、その有効性を提示した。続いて、Skamarock (NCAR) が2つの講演を行った。まずは、モデルの予報結果から、運動エネルギーのパワー・スペクトルを求めてみた。それを観測事実と比較すると、低波数領域での両者のスペクトルに関しては一致しているものの、高波数領域では外れていることがわかった。それはモデルの計算安定のためによく用いられる4次数値粘性が時には過大な散逸効果をもたらすことを暗示したものであった。次に、非静力学モデルのコア評価方法及び標準テストケースについて提案を行った (詳細は3.1節を参照)。余 (東北大学) が直交直線座標系で地形を簡潔に表現する有限体積法の高分解能領域モデルの開発現状及びそれによる層流と乱流のテスト計算例について紹介し、急峻な地形や複雑な建築物の場合にも使えて有望な方法であることを示した。Steppeler (DWD) が 'Semi-Implicit Methods' を題にして発表し、特に高オーダー空間差分スキームと Semi-Implicit 時間積分スキームを併用する場合に、モデルの計算結果を示しながら Semi-

Implicit スキームの有効性について論じた。

(余 偉明)

2.6 データ同化

本セッションでは、2 件の講演があったのみである。1 つ目は、本田（気象庁）が、気象庁で現在開発中の非静力学モデル（JMANHM）に基づいた 4 次元変分法解析システムについての紹介を行った。2 つ目は、Bauer（ドイツ、ホーエンハイム大学）が 2002 年の特別観測 IHOP（International H2O Project）_2002 について行ったデータ同化実験の報告をした。MM5 の 3 次元データ同化による解析を初期とした MM5 と LM による予報を行い、総観スケール・メソスケールの予報は改善されるが、局所対流の表現が難しいことが示された。また、ポスターであるが、Clark（英国、UKMO/レディング大学）が現業化を目指した短期予報解析システムの紹介を行っていた。1 km スケールの現象をターゲットとするために、データ同化でも 3 次元変分法とナッジングの併用などの工夫を凝らしていた。

(本田有機)

2.7 事例解析と精度評価

このセッションでは、6 つの発表が行なわれた。Rezacova（チェコ、大気物理研究所）からチェコで洪水を引き起こしたある事例の LM を用いた再現実験についての発表があった。幾つかの雲微物理パラメタリゼーションとモデル領域の感度実験を行なって、それぞれの実験で計算された降水量と降水の起こる時間についてレーダ観測との比較を示した。加藤（気象研究所）からは 2001 年 6 月 23 日に九州で観測された豪雨の JMANHM による予報の失敗の原因についての発表があった。JMANHM による予報結果をその時期に行なわれていた集中観測や衛星観測と比較することで、下層の水蒸気量が実際よりも少なかったために JMANHM による豪雨の予報が出来なかったことが示された。Zangl（ドイツ、ミュンヘン大学）からは、1999 年 10 月 24～25 日に行なわれた集中観測を対象にした MM5 による地形性降雨の再現実験についての発表があった。MM5 から計算された総降水量が、観測よりも 35% 増えた原因として、シグマ座標での拡散による偽の高高度への水蒸気輸送を指摘し、それを改善することで 15% 程度に降水量の過大評価を抑えられることを示した。Schulz（DWD）からは LM において対流パラメタリゼーションを用いた場合に地形性降雨の降水

量を山の上流側で過大評価、下流側で過小評価してしまうという問題点に関する発表があった。現在のパラメタリゼーションでは降水粒子をすぐに落下させているが、その一部を落下させずに移流させるように変更することで現実的な降水量に近づくことが示された。安永（地球科学技術総合推進機構）からは Spectral Boundary Coupling（SBC）法を導入した JMANHM の長期積分時の性能評価についての発表があった。JMANHM を用いて約 2 カ月間の長期積分を行ない、SBC 法を入れた場合と入れない場合の計算結果（海面気圧、地上の降水量、降水パターン）の比較から、SBC 法を組み込むことで長時間積分時のモデル精度が向上することを示した。Richard（フランス、ポール・サバティエ大学）からは 1999 年 9 月 17 日と 1999 年 9 月 20、21 日に観測された降水イベントを対象にした幾つかのモデル（MM5、MC2、MOLOCH、Meso-NH）を用いた比較実験についての発表があった。どのモデルも比較的良好な結果を示し、モデル間のバラツキはあまり大きくないことを示した。（安永数明）

3. 分科会の概要

3.1 非静力学モデルの評価方法

本分科会で座長の Skamarock（NCAR）と副座長の Badlauf（DWD）のもとで、非静力学モデルを評価するための方法及びテストケースについて議論が行われた。まず、非静力学モデルを相互評価するためには、アクセスのしやすい共通ドキュメントを整備する必要があるという共同認識を得た。すなわち、何を対象に、どのように初期値を与え、どのようなパラメータで実行する等である。その情報を今後インターネット上や学会誌のような情報誌に載せる方針が決まった。次に、テストケースにおける実行例を用意する必要がある。テストケースとして大きく分けて 2 つの場合が考えられた。具体的に、1 つ目には山岳を伴う場合のケース（静止大気、ポテンシャル流、2 次元および 3 次元の山岳波）が提案された。山岳波では、一様流を与えたときに加え、鉛直シアがある場合についても行う。2 つ目には山岳を伴わない（平地の）場合に、降水を伴わない（ドライ）ケース（一様流、重力流、冷たい/暖かいバブルを初期値に与えるケース、内部重力波）と降水を伴う（ウェット）ケース（Kessler スキームによる湿潤対流）が提案された。対流現象でもドライのバブル対流の再現実験や、湿潤なスコールラインのシミュレーション等を行う。（加藤輝之・余 偉明）

3.2 高分解能モデルでの対流の取り扱い

本分科会では Janjic (NCEP) が座長を努め、モデルの分解能依存、雲物理、乱流、放射を含む物理過程の問題を幅広く論じた。積雲解像モデルは数 km 格子が一つの到達点と一般に考えられがちであるが、実際には最小解像度の 2 km スケール程度のところに乱流エネルギーのピークがあるという点が本質的な課題である。雲物理過程のパフォーマンスはモデルの空間解像度と雲を駆動する強制力の大きさに強く依存する。積雲パラメタリゼーションについては Randall グループのスーパーパラメタリゼーションが軽く言及された程度で、具体的な議論はなかった。数 km 格子モデルでは、対流の発生がうまくいかないこと、背の低い対流が表現されないこと、混合層の取り扱いの問題が繰り返し強調された。100 m 格子で LES (Large Eddy Simulation) 的に乱流を陽的に計算することがひとつの目指すべき方向であることが指摘された。一方で、10 km 格子モデルでアンサンブル実験を行うことの利点を Jones (スウェーデン気象水象研究所) が強調していた。(佐藤正樹)

3.3 数値積分法における 2 タイムレベル

本分科会の座長は Klemp (NCAR) で、副座長は Steppeler (DWD) であった。まず、2 タイムレベルスキーム、3 タイムレベルスキームの長所と短所について議論された。要約すると以下である。3 タイムレベルスキームの代表格としては Leap-frog スキームがあげられるが、このスキームは実装が簡単な半面、移流スキームに関して中心差分型に関してのみ安定で、拡散に関しては不安定である。また、分散誤差が大きいし、計算モードを抑えるため時間フィルターの併用の必要があるなど問題点が多い。一方、Runge-Kutta に代表される 2 タイムレベルスキームは実装が多少複雑となるが、時間方向にも空間方向にも容易に高精度化できるなど柔軟性がある。

次に Semi-Implicit スキームと Split-explicit スキームについて活発な議論が展開された。Semi-Implicit スキームを使用する場合、Helmholtz ソルバーの高速化が大きな問題となるが、Semi-Lagrangian スキームとの併用で大きな時間刻幅をとることでこのデメリットは補えるとの意見に対して、大きな時間刻幅を取ることは物理的に不整合的ではないかとの反論が出た。すなわち、大きな時間刻幅の間に湿潤過程に伴う強い浮力がある場合は内部重力波が飛び交

うので、Semi-Lagrangian で期待するような大きな時間刻幅は物理的に不整合をきたす。従って、2 あるいは 3 程度のクーラン数が限界であろう。一方、3 次精度の Runge-Kutta を使えば (他の高次精度空間差分との併用のもと)、クーラン数を 1.7 倍近く取れるので、あまり、Semi-Implicit Semi-Lagrangian の優位性は主張できない。この議論は、高速化を重視する数値予報サイドと物理的メカニズムの再現を重視するサイドとのモデルに対する考え方の相違が浮き彫りにされた形で決着はつかなかった。

その他、力学過程—物理過程のカップリングの問題に関して、どのぐらいの頻度で物理を計算するべきかも命題に上がったが時間の都合で詰めた議論は出来なかった。(富田浩文)

3.4 モデルのソースレベルでの共有化

本分科会では各物理過程コンポーネントの交換を目指してどうするべきかを議論した。基本的にはモデル開発者同士の話し合いを行う必要がある。利点としては、開発時間の短縮やモデルの相互評価の促進が上げられる。最小限必要な物としては、プログラムの記述規則の一元化や完全なドキュメントの作成だろう。また、各物理過程コンポーネントの十分なテストを行う必要がある。困難な点として、異なった予報変数の場合、異なった力学過程 (スペクトル法、格子点法) に関しての共有化、格子点法においても予報変数の格子上での設定位置が異なる場合などが上げられた。また、開発の方向性や著作権の問題も指摘された。さらに、モジュール化したプログラムの抜き差しにより簡単にモデルを実行することはほとんど無理だろうし、2 つ以上のモデルが結合されている場合などはどうするのかなどが議論された。代表的なモデルのソースレベルでの共有化プロジェクトとしてヨーロッパでは EUMETNET で、米国では PRISM を用いて行われている。(富田浩文)

謝 辞

著者である熊谷と本田はこの会議に参加するにあたり科学技術振興会科学研究費「高精度非静力学数値モデルの開発 (1) 基本フレームの確立」から旅費の支出を受けました。

参 考 文 献

Gregory, D. and P. R. Rowntree, 1990: A mass flux convection scheme with representation of cloud ensemble characteristics and stability dependent closure, *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 1483-1506.

栗原和夫, 斉藤和雄, 加藤輝之, 1998: 第2回非静力学モデリング短期数値予報国際ワークショップ参加報告, *天気*, **45**, 389-394.

室井あし, 里村雄彦, 余 偉明, 佐藤正樹, 富田浩文, 那須野智江, 石田純一, 2002: 第4回非静力学モデリング短期数値予報国際ワークショップ参加報告, *天気*, **49**, 221-225.

斉藤和雄, 加藤輝之, 永戸久喜, 清野直子, 村田昭彦, 2000: 第3回非静力学モデリング短期数値予報国際ワークショップ参加報告, *天気*, **47**, 203-210.

Stippeler, J., 1997: First international Short-Range Numerical Weather Prediction workshop on nonhydrostatic modelling, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 469-473.

略語一覧

ALADIN-NH: Non-Hydrostatic model of Aire Limitee Adaptation dynamique Developpement InterNational (フランス気象局が中心としてヨーロッパで開発されている非静力学モデル)

DWD: Deutscher WetterDienst (ドイツ気象局)

EUMETNET: The Network of European Meteorological Service (ヨーロッパ18か国で作られている気象サービスネットワーク)

HIRLAM: High Resolution Limited Area Model (ヨーロッパ8か国が共同で開発している領域メソ数値予報モデル)

IfT: Institute for Tropospheric Research (ドイツ・ライプチヒにある対流圏研究所)

JMANHM: Japan Meteorological Agency Non-Hydrostatic Model (気象庁非静力学モデル)

LM: Lokal Modell (ドイツ気象局領域メソ数値予報モデル)

MC2: Mesoscale Compressible Community model (カナダのメソスケール圧縮性コミュニティモデル)

Meso-NH: Non-Hydrostatic Mesoscale atmospheric model of the French research community (フランスのコミュニティ非静力学モデル)

MM5: The Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model (NCAR/ペンシルバニア州立大学メソスケールモデル第5版)

MOLOCH: MOdello LOcale on H coordinates (イタリア科学技術委員会大気科学・気候研究所で開発された非静力学モデル)

NCAR: National Center for Atmospheric Research (米国大気研究センター)

NCEP: National Centers for Environmental Prediction (米国環境予測センター)

NICAM: Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model (地球フロンティアで開発している正二十面体を使った全球雲解像モデル)

NMM: NCEP Meso Model (NCEP メソモデル)

PRISM: Puget sound Regional Synthesis Model (米国ワシントン大学のプーゲットサウンド湾領域統合モデル)

UKMO: United Kingdom Met Office (英国気象局)

WRF: Weather Research and Forecasting model (米国で統一して開発している次世代メソスケールモデル)