

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*

室井 ちあし*¹・里村 雄彦*²・余 偉明*³・佐藤 正樹*⁴
 富田 浩文*⁵・那須野 智江*⁶・石田 純一*⁷

1. はじめに

より精密な気象現象解明や気候予測, そして毎日の天気予報を支える数値予報システムのための予測モデルの研究開発において, 高解像度への対応は主要な課題のひとつである. 高解像度化する場合には, これまで広く用いられてきた静力学平衡の近似が成立しないため, より精緻な計算を行うために必要な非静力学モデルの研究開発や実用化に向けた取り組みが日本内外で精力的に行われている. 非静力学モデルの実用化にあたっては高速で豊富な計算機資源が必要であるが, 近年の計算技術の進歩がそれを可能にしつつある. 本会合を主催するドイツ気象局は1999年から, 短期予報を支援するために水平解像度7 kmでの非静力学局地モデルLMの現業的利用を開始しており, ヨーロッパにおける非静力学モデルのリードセンターとして非静力学モデル開発の推進役を担っている.

非静力学モデリング短期数値予報国際ワークショップはそのドイツ気象局が主催し, ほぼ隔年で開催されている(第1表). 第4回目となる今回は, フランクフルト郊外の保養地バッドオルブにある公園内の講堂で, 2001年9月24日から9月26日の3日間にわたって開催された. なお, 第1回以外は本誌にも報告されているが, 本報告著者は全員今回がはじめての参加である.

本報告ではまず会議の概要を示し, 次に各参加者が

第1表 これまでに開催された非静力学モデリング短期数値予報国際ワークショップ.

	開催地	会期	参考
第1回	オッフエンバッハ	96年3月11~13日	Steppeler (1997)
第2回	オッフエンバッハ	97年10月27~29日	栗原ほか (1998)
第3回	オッフエンバッハ	99年10月25~27日	斉藤ほか (2000)
第4回	バッドオルブ	01年9月24~26日	

ら各セッションと分科会の内容, 会議の印象等について記す. 末尾に略語一覧をつけた.

2. ワークショップの概要

会議は, 1日目と2日目に口頭発表とポスター発表, 3日目には分科会とポスター発表が行われた. 参加者は, ドイツ, イギリス, フランス, スイス, イタリア, デンマーク, チェコ, アイルランド, ルーマニア, ギリシャ, スウェーデン, アメリカ, カナダ, 日本, 中国, インド, ロシア, エジプト, エストニアの19か国から60人以上と非常に多彩な顔ぶれである. 各国で開催・改良中の非静力学モデルに関する様々な内容について, 29件の口頭発表といくつかのポスター発表があった. 会議直前に米国で発生した同時多発テロの影響で米国の参加者からいくつかの講演キャンセルが

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

*¹ Chiashi MUROI, 気象研究所予報研究部.

*² Takehiko SATOMURA, 京都大学大学院理学研究科.

© 2002 日本気象学会

*³ Weiming SHA, 東北大学大学院理学研究科.

*⁴ Masaki SATOH, 埼玉工業大学/地球フロンティア研究システム.

*⁵ Hirofumi TOMITA, 地球フロンティア研究システム.

*⁶ Tomoe NASUNO, 地球フロンティア研究システム.

*⁷ Jun-ichi ISHIDA, 気象庁予報部数値予報課.

第2表 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の日程（ポスター発表については省略）。

日	時間	セッション（分科会）名	発表件数
25日 (月)	0900-0930	オープニング	4件
	0940-1150	非静力学システム	4件
	1150-1630	数値差分	8件
26日 (火)	0900-1000	数値差分（続き）	2件
	1030-1110	全球非静力学モデリング	2件
	1110-1150	解適合格子	2件
	1400-1650	応用と検証	7件
27日 (水)	0900-1300	分科会 時間積分法 フラックス型方程式 解適合格子 全体報告	

あったが、会合は予定通りに開催された。本ワークショップでは毎回テーマを設定しているが、今年のテーマは「数値計算法」であり、数値差分や時間積分法などについて多くの議論が交わされたのが特徴である。会合の日程と主な内容を第2表に示す。

3. 各セッションの概要

3.1 オープニング、非静力学システム

オープニングではまずドイツ気象局長官の Gartner が挨拶し、この中で Gartner は、9月11日のテロでの多数の犠牲者に哀悼の意を捧げ、参加者全員で黙とうを行った。次に、ヨーロッパにおける気象サービス網 (EUMETNET) において短期数値予報を推進する立場である Quiby (スイス気象局) による挨拶と趣旨説明が行われたあと、ドイツ気象局で LM プロジェクトを先導している Steppeler が、非静力学モデルの過去・現状と、今後の目指す方向性について講演を行った。

引き続き、主要現業数値予報センターで行われている非静力学モデルシステムの開発状況についての発表が行われた。Davis (UKMO) は、UKMO で開発している統一モデル UM について紹介した。UM はメソスケールから気候予測までの幅広いスケールを対象に開発されているモデルで、2001年8月よりルーチンモデルと並行運用されている。また夏と冬についてそれぞれ30日間の予報実験が行われ、上層風の精度低下や低気圧の発達しすぎの問題があり、さらに改善が必要であることを報告した。石田(気象庁)は、水平10 km 格子での運用を目指している MRI/NPD-NHM による

降水の予測精度などについて発表した。Room (エストニア、タルト天文台) は、非弾性バージョンの HIRLAM を用いた水平5.5 km 格子の実験で、静力学モデルより予報精度が向上することを示した。Dom (DWD) は最近の LM の開発状況について報告した。現在は水平7 km 格子で運用しているが、将来2.5 km 格子での運用を目指しており、多くの力学過程・物理過程について見直しが必要であることを示した。

(室井ちあし)

3.2 数値差分

数値差分のセッションの前半について報告する。まず、N. Botta (ドイツ、PIK) が有限体積法を用いて非静水圧力学モデルを作成する際、静水圧平衡を精度よく実現させるための内挿法について報告した。静水圧平衡実現に注意しないと、例えば山岳を入れた場合に全く不自然な鉛直流が発生してしまう実例を見せていた。Sha (東北大学) は直交直線座標系のまま地形を表現する有限体積法モデルでのテスト例を報告。R. Klein (ドイツ、PIK) は、直交直線座標系の有限体積法で地形を表現する際に問題となる、大部分が地中に入るセルの微小な大気部分の安定な計算法について現状を報告した。J. Steppeler (DWD) は、やはり地形を入れた直交直線座標系だが斜面の効果を取り入れた LM では、緩い傾斜の山でも山岳波が精度よく計算できることを示した。M. Baldauf (ドイツ、IMK) は、1次元の圧縮系を例にして時間分割法を行うときのスキームの安定性を議論した。

このように、今回の会議では直交直線座標を複雑地形上のモデルにも適用した例が多く示された。急峻な地形にも使えて有望な方法と思えたが、境界層を分解するには層を薄くとらねばならず、孤立峰だけでなく高原がある場合には鉛直の層がかなり増えるのが難点である。

(里村雄彦)

数値差分のセッションの後半について報告する。地球フロンティアからは那須野と佐藤が発表した。那須野は非静力学モデルで分解能を1.25 km から8 km まで変化させた場合の3次元スコールラインの形状の変化について報告した。佐藤は地球フロンティアで開発中の次世代大気大循環モデルの保存型非静力学方程式系の新しい枠組みについて紹介した。

Janjic (NCEP) は Janjic *et al.* (2001) に基づいて、既存の静力学モデルを非静力学モデルに変更するための簡単な方法について紹介した。この手法は実用的で

あり、Tolstykh (ロシア, ロシア科学院)も全球非静力学モデルへの採用を考えているといていた。Cao (中国, 気象科学院)はメモリー関数を用いた再帰的な時間積分法について紹介し、MM5での適用例を示した。Gassman (DWD)はLMの山岳領域に現れた降水のノイズについて問題視し、山岳と格子間隔の適切な割合、山岳フィルター (Raymond, 1988)の適用について報告した。(佐藤正樹)

3.3 全球非静力学モデリング

今回のドイツのSRNWP国際ワークショップにおいて、なぜか理由はわからないが、全球非静力学モデリングに関する講演発表はかなり少なく、僅かな2件であった。最初の1件はTolstykh (ロシア, ロシア科学院)による発表であったが、そのモデルは静力学近似を用いたものにもかかわらず、このセッションで発表されたことに対して少し意外性を感じた。ただし、全球モデルに空間高精度のコンパクト差分スキームとセミラグランジアン移流スキームを用いたことと実際の計算においても良い結果が得られたこと、そして報告の最後に今後の発展として静力学全球モデルから非静力学全球モデルへ拡張するという報告があったことから、評価したい。2件目は斎藤・室井(気象庁/気象研究所)による講演発表で、MRI/NPD-NHMのグローバルバージョンの紹介であった。結果は試験実験の段階ではあるが、36時間先の予測が行われて満足にいくものを得られたことで、今後の実用性に向けて高い可能性を秘めていることが示された。(余 偉明)

3.4 解適合格子†

解適合格子のセッションにはもともと3件の講演発表が予定されていたが、Wicker (米国, NSSL)の発表はキャンセルされたため、実際に行われたのは2件であった。Bonaventura (イタリア, トレント大学)は航空工学や流体工学の分野でよく利用されている数値手法の1つである解適合格子法を理想に近い実例計算を用いて紹介し、その方法を環境流体力学の分野に

も応用できると提唱した。Hess (ドイツ)は高空間分解能で数値天気予報を行う場合に、計算効率の面を考え格子設計には解適合格子法を用いてもよいと主張した。さらにドイツ気象局においてLMに関して動的解適合格子を用いたテスト実験を進行させていると報告した。総合的に言えば、気象学における解適合格子の汎用性はあるが、将来性は不透明である。とりわけ、気象問題に解適合格子法を適用させる時に、格子細分化するにはどういう基準で行うか、境界のところはどうすべきか、水平方向だけではなく鉛直方向の格子細分化はどうするかといったような未解決な点が残っていることも指摘していた。(余 偉明)

3.5 応用と検証

このセッションでは非静力学モデルを用いた相互比較実験や観測システム実験 (OSE) や初期値化等、さまざまな発表が行われた。室井 (気象研究所)はMRI/NPD-NHMにデジタルフィルターを用いた初期値化を行うことにより予報初期のノイズを減少させることができることを示した。またWood (UKMO)はUKMOで現業運用されているUMの新しい力学コアについて理想的な実験を行った結果を報告した。また、Bettems (スイス気象局)はLMを用いたOSEについて発表した。このセッションの発表だけのことではないが、自主開発のモデルを用いた発表だけでなく、共同開発のモデルや他で開発されたモデルを用いた発表も多かった。日本でもモデルの共同開発の試みが始まっているが、この体制をより強化していく必要があると痛感した。(石田純一)

モデルの評価は、理想化した実験事例を設けるものと現実の降水現象等の再現性をみるものに大別された。前者の例として、里村 (京都大学)らは急峻な地形がある場合の鉛直座標系の取り方について実験事例を設け、 z^* 座標系は 45° を超える傾斜に対しても誤差が小さいことを示した。後者の例としては、R. Ramachandran (インド, ピクラムサラバヒ宇宙センター)らによるARPSを用いたインド周辺の成層構造の再現実験、D. Rezacova (チェコ, 大気物理研究所)らLMを用いたチェコの洪水イベントの実験、A. Erfani (カナダ, プレーリーストーム予測センター)らGEM modelを用いたカナダのスーパーセルの実験などがあり、それぞれ観測データとの比較が示され、特に分解能が上がると(10~30 km から数 km)パフォーマンス

† 差分法のうち、全体的に等間隔に格子を配置するのではなく、シミュレート対象の性質から高解像度が必要とされる場所に格子を集中配置する手法のこと。アダプティブ解析、解適合格子とも呼ばれる。気象計算では、台風などの顕著現象や山岳地帯を対象に用いられることがある。

スが向上することが報告された。事例の再現は確かに有力な評価方法ではあるが、同時にそこからモデル改善に具体的に結び付くような情報を引き出すことの難しさも感じた。(那須野智江)

4. 分科会の概要

3日目には次の3つの分科会が開催され、その後全体に対して分科会の座長から報告が行われた。各分科会の内容についてその概要を記す。

4.1 時間積分法

Janjic (NCEP) が座長となったこの分科会 (Davis (UKMO) もほぼ常に口を挟んでいた) では、時間積分法に関する基本的な問題点や課題が列挙され、今後の取り組みについて意見交換を行った。

現業センターにとっては計算効率の問題が非常に重要ではあるが、実際のプログラムのコードや計算機のスペック等にも依存するために、理想的な状態でモデルを相互比較する必要性も議論された。いずれの観点からみても最適だといえる時間積分法は存在せず、計算効率や安定性、予報精度それぞれの視点から比較検討し、相互に意見交換する必要性があるとの認識で一致した。モデル開発者それぞれが、それぞれの利用目的に応じて(多くの場合は暗黙的に)優先順位を設定し、開発を行っている。しかしながら、計算機の進歩やモデル利用者のニーズの変化とともに、モデルの形態もその進歩や変化に対応していかなければならない。現業センターの開発リーダー達もその点を強く認識しており、相互の協力や情報交換を今後より密にし、非静力学モデル開発における課題を解決していきたいという意向を感じ取ることができた。

(室井ちあし)

4.2 フラックス型方程式

フラックス型方程式の分科会は Klein (PIK) が座長になって議論を進めた。Steppeler (DWD) も副座長であったが、彼によると LM は境界領域で質量の擾乱が生じるため、フラックス型の方程式系へ移行の必要性を問題意識としてもっているということであった。議論は保存の定義からはじまり、どの物理量を保存すべきかについて意見を述べあった。物理法則として、質量・運動量・エネルギーの保存がある。数値予報では質量、気候予測では質量・エネルギーの保存性が重要である。しかし、他のパフォーマンスを犠牲にして、

あるいは他の不確定性があるのに、保存則にこだわるべきではないという意見がある一方で、不確定性を減らすためにこそ基本的な保存則を満たす方程式系をできうる限り利用すべきだという意見の差があった。一方、従来から留意されている温位、エンストフィーや、ラグランジュ的な保存は、限られた条件下での保存則であって、これらのうち何の保存性を重視するかは、問題によって異なるであろう。

Klein や Botta など数理物理屋が議論を主導したので、理想論に片寄る傾向があり、具体的にどうすればよいという話には至らなかった。有限体積法での新しい計算手法として、Method of Transport (Noelle, 2000) などが有望ではないかという話が紹介されていた。なお、Kornbluh (ドイツ、マックスプランク研究所) によれば、化学物質の予報のために特に質量の保存に留意する必要がある、スペクトルモデルから格子モデルへの移行を考えており、特に正20面体格子モデルの採用も考慮しているとのことであった。

(佐藤正樹)

4.3 解適合格子

最初に、座長の D. Kroner (ドイツ、フライブルグ大学応用数学研究所) によって、現在彼の研究室で行われている計算例を交えながら、解適合格子に関する問題が広範囲に渡って提起された。いくつか主要なものを列挙すると、「異なったコードあるいはコンセプトでの比較をどうするか?」、「望ましい格子タイプは、構造型か非構造型か?」、「動的解適合格子の場合、どのように格子を細かくしていくか?」、「動的負荷バランス等の並列化の問題」等々である。座長のプレゼンテーションに対して、解適合格子では、時間スキームについては現在は陽解法が主流となっているが陰解法を使用すると計算精度が落ちるのではないかと、アジョイントコードを含むデータ同化に対して適用可能かどうか、様々なスケールの格子が混在するので物理過程のパラメタリゼーションを見直す必要があるだろう、との質問や意見がでた。

最初の問題「異なったコードでの精度比較」については、非常に細かい等間隔格子系での解を参照解とするしか方法がなく、標準的なテストケースの参照解のデータベースを作成する必要があるとの見解で一致した。これに付随して、どのような量がエラーの評価にふさわしいかの議論に余地を残した。

実際の議論では、解適合格子は果して必要なのかど

うかが大きな焦点となり、大半の時間を費やし議論された。座長が示したように、解適合格子の手法は工学の分野では、衝撃波の捕捉等に良く使われており発達している。しかし、気象あるいは気候問題に目を向けると、陸面あるいは山岳付近で細かくするような固定型格子なら有効であろうが、格子を動的に制御するようなアプリケーションがあるのかは疑問であるという意見が多かったように思う。これに対し、前線やストームを追跡するような問題に対しては動的制御が必要であるとの積極的な意見も出された。

以上の議論に前後し、解適合格子の手法が必要なのかどうかを論じる前にその手法を使うことで本当に速く計算できるかを議論するべきであるとの意見も出された。解適合格子法において非構造格子を使うと、ベクトル型スーパーコンピュータ上での効率が良くない、動的解適合格子法を使うと並列化に伴いロードインバランスの問題が起こる、同時にメモリーの管理およびデータ構造はどうするのか等々多くの計算オーバーヘッドの問題がある。これらが克服されなければ、やる意味がないと言う意見である。これは、使用する計算機に依存しておりケースバイケースであり、一概に結論づけることは出来ないと思われる。

概して、活発な議論が展開され、本ワーキンググループの統一的な見解として、最初のステップとしては、固定型格子で意味ある結果を出すべきで、時間依存型の動的格子はその後であると結論づけられた。今のところ動的解適合格子についてはあまりニーズがなく、細かい格子で覆う地域はあらかじめ分かっており、固定型解適合格子でいまのところ十分である、との認識が大勢を占めているようであった。(富田浩文)

謝 辞

著者の1人である室井は、今回の国際会議参加にあたって、科学技術振興事業団から旅費の支出を受けました。

参 考 文 献

- Janjic, Z. I., J. P. Gerrity and S. Nickovic, 2001: An alternative approach to nonhydrostatic modeling. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 1164-1178
- 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.
- Noelle, S., 2000: The MoT-ICE: A new high-resolu-

tion wave-propagation algorithm for multidimensional systems of conservation laws based on Fey's method of transport, *J. Comp. Phys.*, **164**, 283-334.

Raymond, W. H., 1988: High-order low-pass implicit tangent filters for use in finite area calculations, *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 2132-2141.

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.

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

略語一覧

- ARPS: Advanced Regional Prediction System (オクラホマ大学の領域メソ数値予報モデル)
- DWD: Deutscher Wetterdienst (ドイツ気象局)
- EUMETNET: The Network of European Meteorological Services (ヨーロッパ気象サービス網)
- GEM: Global Environmental Multiscale (カナダ気象センターの全球領域統一数値予報モデル)
- HIRLAM: High Resolution Limited Area Model (ヨーロッパ8か国が共同開発している領域メソ数値予報モデル)
- IMK: Institute for Meteorology and Climate Research (ドイツKarlsruhe大学の気象気候研究所)
- LM: Lokal Modell (ドイツ気象局の領域メソ数値予報モデル)
- MM5: Mesoscale Model (米国ペンシルベニア州立大学と大気研究センターが共同開発しているメソスケールモデル)
- MRI/NPD-NHM: Meteorological Research Institute/Numerical Prediction Division Non Hydrostatic Model (気象研究所/数値予報課統一非静力学モデル)
- NCEP: National Centers for Environmental Prediction (米国の環境予測センター)
- SSSL: National Severe Storm Laboratory (米国の国立シビアストーム研究所)
- OSE: Observing System Experiment (観測システム実験)
- PIK: Potsdam Institute for Climate Impact Research (ドイツのポツダム気候研究所)
- SRNWP: Short-Range Numerical Weather Prediction (短期数値予報)
- UKMO: United Kingdom Met Office (英国気象局)
- UM: Unified Model (英国気象局の全球領域統一数値予報モデル)