

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*

栗原和夫*¹・斉藤和雄*²・加藤輝之*³

1. はじめに

最近の気象予測には数値予報モデルが欠かせないツールになっている。数値予報モデルはこれまで様々な開発されてきたが、現在現業用のモデルとして日々の天気予報で主流となっているのは静力学近似を用いたプリミティブモデル(静力学モデル)である。これまで数値予報モデルは、方程式系を変形して音波や重力波など速い速度で伝搬する高周波波動成分を除いたモデル(準地衡風モデル)から、プリミティブモデルへと進化を続けてきた。プリミティブモデルは、もとの大気方程式にごく近い方程式を用いており、格子間隔10km程度まではよい精度で予報が可能であるとされている。プリミティブモデルが気象予測に用いられ始めた20年位前には、これ以上のモデルは当面必要ないだろうと思われたようで、だからこそプリミティブという名も付けられたのであろう。その後、計算機の進歩は当時の予想を越えた早さで、現在では格子間隔10km以下の高分解能モデルも天気予報に使われようとしている。運動方程式に近似を用いない非静力学モデル(これこそプリミティブと呼ばれるに相応しいと思われるが)は、1960年代に当初は対流などメソスケール現象の研究用の道具として開発されたが、その後の計算技術の進歩と計算機能力の向上により、近年では現実的な予報実験も行えるようになった。最近では、現実的な気象予測のためにも用いられようとしており、各国の予報センターや研究機関で様々な非静力

学モデルの開発が進んでいる。ドイツ気象局もそのような開発を行っている機関の一つで、ヨーロッパにおける非静力学モデル開発のリードセンターを標榜して非静力学局地モデル(Lokal-Modell)を開発し、この2, 3年の内に現業用モデルとして動かそうとしている。標記ワークショップは、非静力学モデル開発を一層促進するための意見交換の場として、ドイツ気象局が隔年で開催している国際会議で、第1回は1996年3月に行われ、今回が2回目である。

2. ワークショップの概要

第1回目はハンブルグで開かれたが、今回はオフエンバッハにあるドイツ気象局で開かれた。オフエンバッハは、国際金融都市として知られるフランクフルトから電車で15分程度のベッドタウンで、会場となった気象局の管理部門と講堂のある建物もドイツらしい町並みの住宅街のなかに静かに佇んでいる。開催期間は、1997年10月27~29日の3日間で、並木の多い静かな道を通いながら、非静力学モデル三昧の日を送ることができた。

参加国は、欧州からは、開催国ドイツ、アイルランド、イギリス、オーストリア、スイス、スウェーデン、デンマーク、フィンランド、フランス、ベルギー、非欧州ではアメリカ、カナダ、オーストラリア、中国などで、日本を含め15か国であった。日本からは気象研究所の栗原和夫、斉藤和雄、加藤輝之の3名が参加した。参加数が多いのは開催国ドイツを除けば、非静力学モデルの開発に力を入れているアメリカ、カナダ、イギリスなど、これまで日本がお手本としてきた国々である。日本での当分野での研究も第一線に近づきつつあるように思えるが、聞いてみると研究者数でもまだ格段の開きがあるようであり、羨ましく感じられた。

オープニングセッションでドイツ気象局研究部長 E. Muller 博士、ドイツ気象局非静力学局地モデル

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

*¹ Kazuo Kurihara, 気象研究所環境・応用気象研究部 (現: 気象庁気候・海洋気象部気候情報課).

*² Kazuo Saito, 気象研究所予報研究部.

*³ Teruyuki Kato, 気象研究所予報研究部.

© 1998 日本気象学会

第1表 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のセッション。()内の名前は座長。

27日(月) 900- 920	オープニング E. Muller J. Steppeler
920-1300	各国モデルの紹介 (Fruhwald)
1300-1400	ポスターセッション (数値計算手法)
1400-1630	数値計算手法 (Saito)
1630-1710	解析と初期化 (Skamarock)
1710-1750	物理過程 (Fiedler)
1800-	ドイツ気象局による懇親会
28日(火) 900- 940	物理過程 (Fiedler)
940-1250	モデルの応用と検証 (Malcolm)
1250-1400	ポスターセッション (モデルのテストと検証)
1400-1800	分科会 物理過程 (Adrian) 数値計算手法 (Klemp) 検証と応用 (Mawson) 高分解能の応用と境界条件 (Fiedler)
1900-	有志によるドイツレストランでの懇親会
29日(水) 900-	分科会報告

ロジェクトリーダーJ. Steppeler 博士の挨拶、会議の趣旨説明が行われたが、その中で、このワークショップの目的が明確に語られたことが印象的であった。即ち、この集会を通じて、ドイツにおける非静力学モデルによる気象予測を一層促進することと、そのための実質的な議論を積み重ねて行くことである。その目的に沿って、プログラムの中に、今後2、3年の間に行わなければならない開発・研究項目は何かを具体的に明らかにするための、議論の時間が組み込まれていたのが特徴的であった。会議の日程を第1表に示す。

3. 各国の非静力学モデルの紹介

各国モデル紹介のセッションでは、日本の気象研究所予報研究部で開発されている非静力学モデル(MRI-NHM)を皮切りとして、アメリカ、ドイツ、イギリス、カナダなどのモデルの紹介があった。齊藤はMRI-NHMの完全圧縮系バージョンについて、その力学フレームの特徴と1993年鹿児島豪雨を対象とした25 kmと10 km、及び5 kmの異なる分解能による予報実験の結果について報告を行った。高い分解能でのシミュレーションの結果では、降水量の集中がよく予想されること、豪雨に伴って解析された地表風系の低気圧性メソスケール循環が、5 km分解能のシミュレーションでは再現されていることを示した。これに続き、

米国環境予報センター(NCEP)のJuangによる非静力学スペクトルモデルの紹介、MacDonald(米国大気海洋庁; NOAA)による準非静力学モデルという鉛直方向の運動方程式に現象の縦横比に応じた定数を掛け静力学モデルとのつながりを良くしたモデルの紹介があり、ドイツのカールスルーエ大学のモデル(Adrian and Fiedler)、イギリス気象局の現業予報と気候シミュレーションのために開発された全球非静力学モデル(Malcolm *et al.*)、カナダ気象局のMC2(Mesoscale Compressible Community)モデル(Thomas *et al.*)、ドイツ気象局の非静力学局地モデルLokal-Modell(Doms)などの概要説明や数値手法・物理過程の紹介があった。

ここでLokal-Modellについて述べておく。このモデルはアメリカのペンシルバニア州立大学と米国国立大気研究所NCARが共同で開発したMM5(Mesoscale Model 5)を参考にして、ドイツ気象局が開発した弾性系の非静力学モデルで、水平方向の座標系として回転球面座標を用いている。時間積分は、高周波の重力波と音波を含む方程式の項は短い時間ステップで、移流項などその他の項は長い時間ステップで計算するsplit-explicit法で行っている。力学部分について、MRI-NHMとの比較を第2表に示す。ドイツ気象局では、1998年から7 kmメッシュでドイツ全域をか

第2表 ドイツ気象局局地モデル (Lokal-Modell) と気象研究所非静力学メソスケールモデル (MRI-NHM) の仕様

	Lokal-Modell	MRI-NHM
方程式系	完全圧縮系, 但し気圧方程式で非断熱項を省略	同左, 連続の式に降水物質の落下を考慮
予報変数	風, 気圧, 温度	運動量, 気圧, 温位, 乱流エネルギー
座標系 (水平) (鉛直)	回転球面座標 地形に沿った座標系	ポーラステレオ 同左
格子構造 (水平) (鉛直)	Arakawa-C グリッド ローレンツ型	同左 同左
移流計算 (精度)	移流型 (2次)	フラックス型 (2次), オプション水平 4次
時間積分法 (音波関連)	2次のリーブフロッグ法にタイムフィルタを併用 1次の前方後方法	同左 —
音波の扱い (水平)	エクスプリシット	セミインプリシット
音波の扱い (鉛直)	インプリシット	同左
重力波の扱い	インプリシット	エクスプリシット
乱流の扱い	Mellor-Yamada レベル2.0	Deardorff レベル2.5
計算拡散	4次線形拡散に divergence-type 音波フィルタを併用	4次線形拡散, オプション非線形拡散
上部境界条件	固定壁+レーリー摩擦	同左
気圧下部境界条件	線形外挿	力学条件
側面境界条件	デイビス型吸収層	オーランスキの放射条件

バーする試験運用を開始する予定で, 2002年以降には鉛直50層の2.5 km メッシュモデルを現業的に走らせるという将来構想をもとに開発を行っている。物理過程では境界層過程に精密なものを用いており, 地表面過程にはSVAT (Soil Vegetation Atmosphere Transfer) モデルによる植生の効果を組み込んでいる。大学など他の研究機関でも Lokal-Modell の利用が始まっており, ポスターセッションの大部分はこのモデルに取り組んでいるドイツ気象局を含めた多くの研究者・学生によるものだった。現在日本では, 研究用のモデル開発が中心で現業用には10 km メッシュ程度を想定した開発がようやく始まったばかりであること, 非静力学モデルに携わっている研究者の数もそう多くないことを考えると, その意気込みに圧倒されるような気持ちになった。その他の国のモデルも, 静力学モデルとの精度比較が, 様々な統計的なスコアにより行われ, 静力学モデルと比べ, 既に遜色ないあるいはより高精度になっていることが示されるなど, 開発が着々と進んでいる様子が伺い知れた。

これら紹介のなかで, もう1つ, 強調しておきたいことは, 非静力学モデルを, 短期予報のための狭領域メソスケールモデルだけではなく, 全球モデル, ある

いは, 気候モデルにも用いようという試みである。これは, イギリスの発表の中で明確に謳われ, 示された結果も全球モデルの結果であった。このことは, 非静力学モデルが, 静力学モデルに比肩しうだけの計算効率も獲得しつつあることを示しており, 非静力学モデルのより広範な活用について明るい将来展望を示してくれているように思われた。

4. 数値計算法

数値計算法に関してはNCARのKlempによる鉛直座標系の比較の発表があった。非静力学モデルの鉛直座標について, 地形に沿った高度座標(z^* 座標), 地形に沿った気圧座標(シグマ座標), アメリカの気象局の現業予報モデルで使われているステップ地形座標の比較を, 山岳波などのシミュレーションを通して行ったものである。高度と気圧の座標系では, 精度は変わらないが, 計算効率の点で高度座標のほうが優れていること, ステップ地形座標では低分解能の場合に山の側面でのノイズが出やすいことなどを示した。同じNCARのSkamarockは, 上空では温位座標, 地表近くでは地形に沿ったシグマ座標になるハイブリッド鉛直座標系の方法や問題点を指摘した講演があった。こ

の中で、鉛直方向の層間隔は、スムーズに変化しなければならないという結果を示していた。その他、Runge-Kutta法を用いた時間積分によると暖かいバブルのシミュレーションでノイズが少ないことを示した報告 (Wicker and Skamarock), 境界条件の与え方として、大規模場については外部のモデルの場に置き換える方法を用いた場合、内部に振動を生ずるなどの問題点に関する研究 (Brucher), ステップ地形座標を用いた非静力学モデル (Minotte and Steppeler) の報告などがあった。オーストラリアから1人参加した McGregor は、等角立方体を使った格子構造を持つ静力学全球モデルについての紹介を行った。

5. 解析と初期値化

このセクションでは、NOAAの準非静力学モデルでテストされた Bounded Derivative Initialization (BDI) と呼ばれる初期値化法についての結果 (Lee and MacDonald) と、スイス・チューリッヒにおけるドップラーレーダーを用いた風のリトリーバルとノウキャスティングについての発表があった。

6. 物理過程

物理過程についてはドイツからの発表が4件あった。今回は特に地表面過程に重点が置かれていた。土壌・植生・大気間のエネルギーや水の輸送を計算するモデルを開発し、精度評価を行ったという発表 (Mengelkamp and Warrach), 非静力学モデルの地表面過程で降水の run-off を組み込んだ場合の効果が、土壌水分量や地表面温度などに現れるという発表 (Moelders), Lokal-Modell への乱流エネルギーを予報する Mellor and Yamada のレベル2.5の境界層過程の導入に関する発表 (Raschendorfer) があった。その他、MM5を用いた対流スキームと土壌モデルとの相互作用についての発表 (Pfeiffer and Grell) があり、夏のケースでは、土壌が乾燥している場合では雨量が減少するなどの影響が現れるという内容であった。

7. 非静力学モデルの応用と検証

ここでは主にモデルの精度評価について論ぜられた。最初は、イギリス気象局の現業天気予報と気候予測のための非静力学モデルについて、Eady-wave と孤立峰周辺での流れについてシミュレーションを行い、精度を示した発表があった (Mawson *et al.*)。ハンブルグ大学の Schlunzen は、高分解能モデルの評価

では、これまでのモデルの結果と通常の観測のデータを比較する方法は十分でなく、プログラムコードの品質や結果の品質などを考慮すること、また対象として地形なしの簡単なケースから、次第に複雑なケースについて段階を追ったテストを行っていくべきだという発表を行った。

日本の気象研究所からこのセッションで続けて3題の発表を行った。斉藤は、オーストラリア北部のメルビル島で行われた国際共同観測 MCTEX (Maritime Continent Thunderstorm Experiment) で観測された熱帯日変化性雷雲の数値シミュレーションについて講演を行った。オーストラリア気象局研究センターの新領域解析予報システム (25 km 水平分解能) に2重ネスティングした1 km 水平分解能のMRI-NHMにより、海風前線上に発生した散在する対流雲が、時間とともに強まり融合した後、コールドプールからのガストフロントを引き金として別の対流雲が発達する過程について示した。栗原は、非静力学スペクトルモデルと日本の気象庁の現業用静力学スペクトルモデル (JSM) を比較し、精度や計算時間の効率などについて論じ、両者が実用性について遜色ないことを示した。加藤は、1996年の九州の梅雨期約1か月間を対象に、MRI-NHM と気象庁の現業用スペクトルモデル (RSM) による降水の予想結果をレーダー・アメダス解析雨量と比較し、各種の客観スコアにより統計的に精度評価をした結果を報告した。暖かい雨の雲物理過程をそのまま用いた10 km 分解能のMRI-NHM では、降水面積が実況に比べ小さく予測される傾向があり、強雨予想には有効だが10 mm/h 以下の降水についてはRSMよりスコアが劣ること、RSMで再現される降雨量の日変化がMRI-NHMでは不十分で、原因としてMRI-NHMに放射過程が含まれていないことが考えられるという講演を行った。

これらに続き、ドイツ気象局のLMモデルの予報値から対応するレーダーの反射強度を計算する発表 (Hasse and Simmer) や、大気汚染などを予測するMM5と化学モデルの結合の紹介 (Grell *et al.*)、MM5による中国南部の豪雨のシミュレーションの結果 (Jianjie and Xiaorong) などが紹介された。

8. 分科会

2日目の午後からは、非静力学モデルの今後の開発課題について討議するための分科会が開かれた。会議参加者は、物理過程、数値計算法、精度評価と応用、

高分解能(格子間隔100 m程度)へのモデルの適用と境界条件,の4つの分科会に分かれ,最終日に総会で各分科会座長から報告が行われた。

物理過程の分科会では,土壤水分,地表面状態,乱流,境界層,雲,降水,放射などについて,どのような改良をなすべきかという報告があった。特に土壤水分,地表面状態については詳しく議論された。土壤水分の予報のために,水のrun-off,地中での水平方向の水輸送が重要であることが強調され,土壤水分に関して境界条件が与えられないので境界付近で乾燥しやすくなるなどの問題点があげられた。また土壤水分の解析,初期値化の必要性などにも触れられた。地表面状態も重要であり,土壤の質,被覆度,植生などのデータを使い,物理的なパラメータにするにはどうすべきか,地域によりデータの無いところがあるがどのように取り扱ったらよいか,衛星のデータを使い地表面のパラメータを求める方法を検討すべきである,など多くの議論が行われた。なぜここまで地表面過程,特に水分についてこだわるのか不思議だったが,聞いてみるとこれが雨の予報に大きな影響があるということであった。さすがに,ドイツは大陸の国であることを再認識した。日本では水蒸気の補給源にはあまり神経を使わないで,もっぱら降水過程に精力を注ぐことができたのは,日本が大陸から離れた島国で,水蒸気の大部分は海から容易に補給されるからであることを,うかつにもその時気付いたのである。降水過程については,雲物理過程を使って大気の水成分量を予報する方法の利用が必要であることが議論された。しかしそれだけではなく,何らかの降水のパラメタリゼーションも必要であるということが述べられ,湿潤乱流クロージャ法,Kein-Fritsh法の改良などに言及された。

数値計算法の分科会では,Split-explicitモデルの創始者でもあるNCARのKlempが座長となり,非静力学モデルの鉛直格子の座標系や構造,離散化手法,音波の扱い,時間積分法,境界条件等について活発な意見が出された。非静力学モデルの数値計算法は現在様々な方法が試みられており,百花繚乱ともいえるほどである。例えば,鉛直座標系のとり方では,初日の数値計算法のセッションでも関連講演があったが, z^* 系,シグマ座標,温位座標,ステップ地形などがあり,構造もローレンツタイプ,チャーニー・フィリップスタイプに分かれている。水平の離散化手法については,スペクトル法について興味深い議論があった。前回ワークショップでは,スペクトル法を使うモデルは並

列化に向きでもはや時代遅れだという雰囲気だったらしいが,その後並列化にも十分対応しうることが示され,見直されてきているというものであった。NCEPのJuangは層ごと変数ごとにCPUを割り当てるという方法にすでに着手しているとのことであった。音波の扱いについては,音波関連項に小さなタイムステップを用いるSplit-explicit法と音波関連項を陰解法で扱うインプリシット法に分けられる。今回参加機関のモデルではドイツ気象局(LM)とNCAR(MM5)が前者,日本(MRI-NHM,栗原),イギリス(Malcolm),NCEP(Juang),カナダ(Thomas)が後者のタイプである。非静力学モデルの数値計算法の基礎的な問題ながらそれぞれ利点や欠点がある。境界条件や離散化については,近年需要が高まっている領域気候モデルのための応用の観点で物理量の保存の重要性が論じられた。その他,データ同化,物理過程の改善,地形の取り扱いの改善,モデルをテストする事例の提案などが行われた。今後様々なケースについてモデルの比較を行い,種々の計算法の利点や欠点を明らかにしていくことと,そのためのGCSSやCOMPAREなどモデルの相互比較プロジェクトの意義について再確認した。

そのほか,精度評価と応用の分科会では,精度評価のために,質の良いアクセスの容易なデータセットの整備が必要であることが述べられ,またモデルの結果の応用のために,通常出力だけでなく,例えば大気汚染モデルなどのために,安定度や拡散係数などのパラメータを出力するべきであるという報告があった。高分解能(格子間隔100 m程度)へのモデルの適用と境界条件の分科会では,これまでいくつかの経験と解析はあるが,まだ明らかでないところが多く,標準的な方法というものもないため,今後さらにケーススタディを重ね,様々な方法を試みる必要があることが述べられた。

9. おわりに

これまで何回か,狭領域数値モデル関係の研究集会に出席した。いずれも規模はそれほど大きくない。実質的には50人を切る程度の参加人員の研究集会である。しかし,実質的な議論をするにはこの程度の人数がちょうどよいように思われる。会議はごく家庭的な雰囲気の中で行われ,肩肘張らずに議論ができる。会議の終わる頃には,また何人かのモデル開発者と知り合いになることができる。今回は会議の途中で2度

夕食会があって、ドイツ料理を楽しみながらドイツの人とドイツの話をして過ごした。10月にしては記録的な寒波のため最低気温は連日氷点下になったが、ドイツの町の落ち着いた良さを実感することができた。フランクフルトにあるワイマール共和国宰相にして文豪のゲーテの生家も見て感動した。またここで、2年後に、第3回目の非静力学モデルの研究集会が開かれることを期待している。そのときにはまた大いなる成果を携えて参加することができ、知った顔のあるいは新たに知り合えるだろう未知の研究者達と話ができたらと思いつつ、ドイツ気象局を後にした。

略語一覧

COMPARE : Comparison of Mesoscale Prediction and Research Experiments (メソスケール予報・研究実験比較)

GCSS : GEWEX Cloud System Study (GEWEX 雲システム研究計画)

GEWEX : Global Energy and Water Cycle Experiment (全球エネルギー・水循環研究観測実験)

LM : Lokal Modell (ドイツ気象局の非静力学局地モデル)

MCTEX : Maritime Continent Thunderstorm Experiment (海洋大陸雷雨観測実験)

MC 2 : Mesoscale Compressible Community Model (カナダ気象局の非静力学モデル)

MRI-NHM : Meteorological Research Institute Non-Hydrostatic Mesoscale Model (気象研究所の非静力学メソスケールモデル)

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

NCEP : National Center for Environmental Prediction (米国環境予報センター)

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration (米国海洋大気庁)

RSM : Regional Spectral Model (気象庁数値予報課の現業用狭領域スペクトルモデル)

SRNWP : Short-Range Numerical Weather Prediction (短期数値予報)

SVAT : Soil Vegetation Atmosphere Transfer (土壌・植生・大気間輸送モデル)