

第16回メソ気象研究会報告

1. 趣旨説明

齊藤和雄（気象研究所）

第16回メソ気象研究会は、「非静力学モデルの現状と課題」というテーマで、日本気象学会2000年秋季大会前日の10月17日に文部省共済組合京都宿泊所「御車会館」で開催され、これまでで最大規模の約130名が参加した。

近年の計算機性能の向上と数値モデルの進展により、従来は困難だった個々の雲を解像する分解能での現実現象の再現実験が可能になってきており、観測プロジェクトと結合することにより、メソ気象研究のための新たな break through になりつつある。領域予報の分野では、現業天気予報のためのモデル開発が始まっており、非静力学モデルの実用化がスケジュールに上ろうとしている。また領域気候や大気大循環といった、これまでとは異なる分野へのモデルの応用も考えられるようになってきている。その一方で、現在の非静力学モデルは必ずしも完成されたものとはいえず、まだ多くの改良すべき点や課題を残している。

このような意味で、今回非静力学モデルをテーマにメソ研究会が開かれることはタイムリーな企画と言える。非静力学モデルは気象学の様々な分野に関わるようになり始めているため、本研究会でも今後も様々な形でテーマに取り上げられることが予想される。今回はその最初の研究会として、非静力学モデルの現状と課題についてを中心に、各方面から8名の方に話題提供を頂いた。座長には、気象研究所の吉崎正憲室長と東北大学の岩崎俊樹教授を、また講演に引き続いての総合討論の司会には筑波大学の木村富士男教授をお願いした。なお今回の研究会開催にあたり、京都大学の里村雄彦助教授には、会場の手配その他で大変お世話になった。

2. 「非静力2000」の活動の紹介

岩崎俊樹（東北大学大学院理学研究科）

21世紀には気象予測や気候監視について一層高度な情報が求められるようになる。このような要請に応えるために次世代気象学は精密科学を指向しなければならない。そのための研究基盤として高性能の非静力学モデルは欠くことのできない道具である。しかしながら、多機能で高度の非静力学モデルシステムの開発には多くの専門家の協力が必要である。また、モデルを改良するためには様々な事例でくり返しテストを行う必要がある。何よりも人材の育成が不可欠である。

このような認識に基づき非静力学数値モデルの共同開発と高度利用を目指す有志団体として「非静力2000」を発足させた。2000年4月には、文部省科学研究費が認められ、資金と責任をもつ研究団体となった。現在の活動目標は以下の通りである。

- (1) 高精度非静力学モデルを利用した気象および気候研究の推進
- (2) 高精度非静力学モデルの力学フレームの開発
- (3) 高精度非静力学モデルのための物理過程パラメタリゼーションの開発

活動の一環として2000年10月から気象研究所/数値予報課統一非静力学モデル (MRI/NPD-NHM) のグループ利用を開始した (2000年12月現在10機関)。

海外にはRAMS, ARPS, MM5などのコミュニティーモデルがある。非静力2000もそのようなコミュニティーモデル・ライブラリーを目指したいが、母屋を張るような大きな組織がないことが悩みである。次善の策としてネットワークによって情報を交換しモデル開発を行うことを考えている。全体が機能するまでには時間が必要である。相互扶助の精神で必要なインフラを整備していきたい。また、できるだけオープンに活動したいと考えているので、御意見等をお知らせ下さい。

3. メソモデルの課題と現状および地球フロンティアのメソモデルについて

木村富士男 (筑波大学)

地球フロンティア水循環領域では陸面のパラメタリゼーションを推進している。ここ数年間は植生や積雪・凍土などのプロセス研究とモデリングを進めてきていて、現在はこれらを総合して、Sib等に代わる新たな大気陸面モデルの構築を進めている。

アジアモンスーンの季節進行や年々変動に及ぼす陸面過程の役割の解明を目指すため、大気大循環モデルと領域気候モデルを使った感度解析にも着手したところである。気候に及ぼす陸面の影響には主として熱・水蒸気交換に影響を与える地表面過程と、力学的、熱的の両面から大気に影響を及ぼす起伏効果の2つがあり、両者は深く関連し合っている。起伏の効果は大気モデルでは基礎方程式を z 系や σ 系と言った地形に沿った座標系に書き換えることにより表現しているが、領域モデルの空間分解能をあげようとする、急峻な地形上では座標系の非直交性が大きくなるため、様々な不具合が生じることがある。とくにアジアモンスーンのモデリングではヒマラヤやチベット高原の地形影響を扱うことは不可欠であり、さらに複雑地形での積雲対流のパラメタリゼーションの信頼性を考えると、モデルの高分解能化も必須となるため、必ずこの問題に直面することになる。

現在、急峻な地形でRAMSによるシミュレーションを実施したときの諸問題を調べている。RAMSでは平原あるいは緩い斜面上で調整されている計算スキーム安定化のための工夫が、斜面が急になることにより破られるため、計算不安定が多発することがある。音波に対しては鉛直のみに陰公式を使っているため、水平格子間隔で時間差分を決めているが、急傾斜になるとこれでは不十分なこと、急傾斜地では鉛直格子間隔の狭い下層でも w 成分(地形に沿った座標でみた鉛直成分)が大きくなり通常は時間差分を決めるには無視している安定条件が重要になってくることなどがある。これらの問題を乗り越えたところで差分の打ち切り誤差が斜交性のため拡大していると見られる現象が確認された。

4. 並列計算によるビン法雲物理過程導入3次元モデルでの積雲群対流実験

志村和紀 (高度情報科学技術研究機構)
数値実験に使用したモデルは3次元非静力・非弾性

モデルであり、雲の微物理過程はTakahashi (1976)により定式化されたものである。降水粒子は水滴、霰、雹、氷晶の4カテゴリーに分類され、さらに水滴、霰、雹は球形を仮定して45クラスに、氷晶は円板形を仮定し半径21クラス、厚み5クラスにクラス分けされている。

水平面を均等に2次元領域分割することにより並列化を行った。実装にはMPI (Message Passing Interface)ライブラリを使用している。並列計算時の負荷分散等の考慮はまだされていないため現状での高い並列性は期待していない。今後の課題である。また、並列化された各プロセスは自己の担当する領域のデータだけを持つためより広領域での数値実験が可能となっている。

計算領域は格子数 $111 \times 111 \times 61$ とし、水平・鉛直方向の格子間隔はそれぞれ400 m, 200 mである。境界条件は側面にopen (radiation condition)、上下にrigid free slipを用いている。水平一様な熱帯の平均的成層を基本場とし、初期条件として下層にランダムな温位じょう乱を与えている。

東京大学情報基盤センターの日立SR8000 (2ノード: 16PE)を使用し、海洋性ICE/WARM/FROZEN、大陸性ICE/WARMの各環境条件下において180分間の数値実験を実施した。結果として、雲の発達過程も降水量も雲物理過程の違いで大きく異なった。降水量は海洋性ICEの場合が最大となり最少の大陸性WARMに比べ約10倍となった。また、海洋性ICEでは雲群が一般風に垂直に並び、降水も長続きした。さらに、強い降水と雲の発達には霰落下と近傍の雲セルからのdrizzleの供給が必要であった。

今後は雲パラメタリゼーションの検証を目的として、さらに広領域高解像度の数値実験を行う予定である。

参考文献

Takahashi, 1976: Hail in an axisymmetric cloud model, J. Atmos. Sci., 33, 1579-1601.

5. 名大での雲解像モデル開発の現状

坪木和久 (名古屋大学大気水圏科学研究所)
名古屋大学大気水圏科学研究所では科学技術振興調整費「ダウンバースト現象の高度シミュレーションに関する研究」(研究代表者: 神谷信彦教授)の一環として、大規模並列計算機で効率よく実行できる雲解像モ

デルを開発している。目的は大規模な並列計算により雲スケールからメソスケール現象、特にダウンバーストなどの積乱雲に伴う現象を対象として、それらのシミュレーションを行うことである。現在、開発の第1段階を完了したので、そのモデルの特徴といくつかの結果についての報告をした。

ここで開発している雲解像メソスケールモデルの主要な特徴は次の通りである。

基礎方程式系は非静力学・圧縮系、計算は3次元領域で地形を含む。力学過程の従属変数は、速度の3成分、温位偏差、気圧偏差、および乱流運動エネルギーである。現在のところ雲物理学過程として、バルク法の「暖かい雨」および「冷たい雨」を導入した。空間微分は差分法を用い、時間積分は時間分割の方法を採用している。乱流は乱流運動エネルギーを用いた1.5次のクロージャによるパラメタリゼーションを用いている。移流の計算は4次の精度である。初期条件には高層観測などのプロファイルを水平一様に与えるか、広領域モデルにネスティングする場合は、その出力値を内挿した3次元の非均一データを与える。境界条件には放射境界を含む様々なものを用いることができる。

並列計算にはMPIを用い、領域分割は矩形領域の2次元分割を用いている。計算領域はメソスケール程度を考えているので、地図投影は今のところ取り入れておらず、矩形領域での計算のみである。

ここで開発したモデル、Cress (Cloud Resolving Storm Simulator) は、ソースコードレベルで公開しており、その目的にかかわらず自由に使うことができる。このモデルはほとんどの大型計算機で実行を確認している。詳細は<http://www.tokyo.rist.or.jp>にあり、そのソースコードとドキュメントはここからダウンロードできる。

6. 気象庁非静力学モデル開発の現状と課題

室井あし (気象庁数値予報課)

気象庁では、短期予報 (今日・明日の天気予報) 支援のためのRSM (水平分解能20 km) と防災予報支援を目的としたMSM (水平分解能10 km) を運用している (MSMは試験運用)。これらRSM、MSMはいずれも静力学平衡の仮定をした領域スペクトルモデルである。

メソスケール数値予報の精度向上のためには、メソ現象に適した分解能での観測網の拡充、データ同化手法と予報モデルの高度化が必要不可欠である。観測網

の拡充については、ウィンドプロファイラー網が来年から稼動することに加え、GPSデータやドップラーレーダーデータおよび航空機自動観測データの利用が見込まれている。データ同化手法の高度化についても、2002年度には世界初の4次元変分法によるメソ・データ同化の実用化が実現する見込みである。

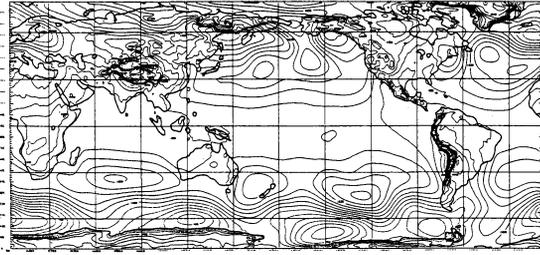
一方予報モデルについては、気象研究所と共同で非静力学モデルMRI/NPD-NHMの開発に取り組んでいる。積雲を陽に解像する雲物理過程の導入により強雨予測に対してどれだけのスキルがあるかに注目し開発を続けており、2003年度には非静力学モデルを実用化したいと考えている。コードの並列計算機への対応やより効率的な時間積分法 (スプリット・イクスプリシットスキーム) の導入により、最大の課題であった計算時間の短縮についてはほぼ達成できた。残る重要課題としては、雲物理過程の開発があげられる。暖かい雨 (Warm rain) タイプの雲物理過程では冬季の降雪をうまく表現できない。しかし雲氷・雪・あられを含む過程では計算量が非常に多くなってしまった。したがって、雲氷等の持つ本質的な効果を効率的に取り込んだ雲物理過程の開発に今後の重点を置く予定である。

観測網の拡充や4次元変分法によるデータ同化と併せ、非静力学モデルの実用化によりメソスケール現象の予測可能性が飛躍的に向上し、これからの気象予報は1オーダー高い次のステップに進んでいくと期待される。

7. 全球非静力学モデルの開発について

斉藤和雄 (気象研究所予報研究部)

非静力学モデルは、これまでメソ現象の研究を目的とした雲解像モデルとしての利用が中心だったが、最近では気候研究への応用も考えられるようになってきており、全球非静力学モデルの開発も各方面で始まっている。将来の全球非静力学モデル開発の最初のステップとして、気象研究所/数値予報課統一非静力学モデル (<http://www.mri-jma.go.jp/Dep/fo/mrinpd/INDEXJ.htm>) について、従来の等角投影に加えて、球面上の直交曲線座標系 (ξ, η, z) に対応できるように拡張した。水平座標系として経緯度座標 (λ, φ) を用いる場合、方程式系は以下の球座標方程式系に縮退する。



第1図 水平分解能1.45度の非静力学モデルによる36時間予報の平均海面気圧場。

$$\frac{du}{dt} - \frac{uv \tan \varphi}{a} + \frac{uw}{a} + \frac{1}{\rho a} \frac{\partial p}{\cos \varphi \partial \lambda}$$

$$= 2\Omega v \sin \varphi - 2\Omega w \cos \varphi + DIF. u$$

$$\frac{dv}{dt} - \frac{u^2 \tan \varphi}{a} + \frac{vw}{a} + \frac{1}{\rho a} \frac{\partial p}{\partial \psi} = -2\Omega u \sin \varphi + DIF. v$$

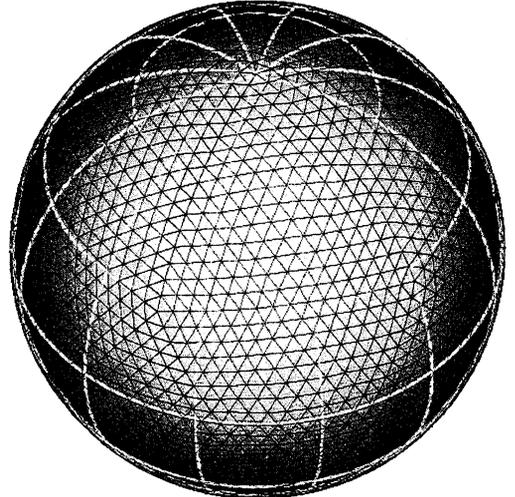
$$\frac{dw}{dt} - \frac{u^2 + v^2}{a} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g = -2\Omega u \cos \varphi + DIF. w$$

モデルではこれまでの等角投影との対応をとるため、基準緯度 φ_0 で ξ , η 軸に沿ってのマップファクター m , n が共に1となる円筒正距座標系に変換してから運動量を予報変数とするフラックス形式にしている。

斉藤 (2001) でメルカトル投影法による結果を示した、1999年3月1日00UTCの気象庁等圧面全球解析データを初期値とする36時間予報の平均海面気圧場を第1図に示す。水平分解能は経緯度とも1.45度で、計算領域は全球の約95%をカバーする南緯80度～北緯80度、東経5度～西経7度である。モデル地形は高度6000mを超えるヒマラヤ山脈や4000mの南極大陸の一部を含んでいる。鉛直座標は38層、ドライモデル、海面・地面温度は最下層の大気温度で代用している。本格的な全球モデルにするためには多くの開発課題が残っており、多くの方の協力を頂ければ、と期待している。

参考文献

- 斉藤和雄, 2001: 非静力学モデルの開発と数値実験による研究—2000年度日本気象学会賞記念講演一, 天気, 48, 11-25.



第2図 正20面体測地線格子。

8. 地球フロンティアにおける次世代大気大循環モデルの開発

佐藤正樹*, 富田浩文, 津川元彦, 肖鋒** (地球フロンティア/*埼玉工業大学, **東京工業大学)

地球フロンティアでは、地球シミュレータ上で実行させることを念頭に高分解能の大気大循環モデルの開発を進めている。このモデルは、数10年スケールの長時間積分を念頭においた気候予測に用いることを目的としている。分解能が現状の大気大循環モデルより1桁ほど高くなるので、基本設計から見直す必要がある。並列計算の効率性から全球格子モデルとし、非静力学圧縮性方程式系を採用する。現在は次の2つの方向からのコーディングを進めている。

第一は球面上の浅水波モデルであり、正20面体測地線格子 (第2図) と等角立方体格子の2タイプの格子系を採用している。正20面体測地線格子は球面一様性という点で優れているが、等角立方体格子には様々な保存性を満たす差分スキームを使えるという点で利点がある。現在は、基本テストをほぼ終了し、他グループの同種モデルと比べて精度の高い結果を得ている。

第二は領域を限定した非静力学モデルである。長時間積分が可能な保存性を満たすスキームの開発、step mountain による山岳地形の表現の二点を新しく試みている。従来の圧力方程式を用いる代わりに、密度と内部エネルギーをフラックス形式で予報した水平陽解法・鉛直陰解法のスキームを導くことができた。また、step mountain において、発散の計算に sub-grid での

地形効果を導入することで重力波の表現に改善が得られた。水平分解能5~10 kmのもとの雲物理のチューニングが課題である。

今後、地球シミュレータの稼働までに、球面上の3次元非静力学モデルとしての力学フレームを完成させたいと考えている。

9. Mellor-Yamada Level 3 乱流モデルについて

中西幹郎 (防衛大学校地球海洋学科)

Nakanishi (2001) に基づいて、Mellor-Yamada 乱流モデルの改良と Level 3 モデルの必要性について述べた。

改良に利用するデータベースは、格子平均の乱流モデルである Large-Eddy Simulation (LES) を用いて作成した。LES で得られた結果をカンザス実験の観測結果と比較し、LES が接地層における物理量の鉛直分布の特徴をよく再現することを確認した。

Mellor-Yamada モデルに代表されるアンサンブル平均に基づく乱流モデルの欠点は、3つほど指摘されている。その1つは、圧力共分散項のパラメタリゼーションに浮力効果を考慮していないことであった。この効果を加えることは未知定数(クロージャー定数)を増やすことを意味するが、LES データベースを活用し、すべてのクロージャー定数を見積もりなおした。2つめは、長さスケールの不十分な表現であった。長さスケールの観測値が少ないことが原因であるが、LES データベースから、成層の変化に伴う長さスケールの変化を考慮した代数式を作成することができた。

乱流モデルの目的は、サブグリッドの乱流フラックスを求めることである。Mellor-Yamada Level 3 モデルが予報する拡散係数を LES データベースで得られた結果と比較し、上記の改良を加えることが再現性の改善につながることを確認した。なお、混合層上部において、温度の拡散係数が負になる特徴があった。これは逆勾配拡散の構造を表しているが、Level 2.5 以下のモデルではこの構造を表現できない。

Mellor-Yamada 乱流モデルの改良はある程度成功した。この改良を最大限生かすためには、Level 3 以上のモデルを採用することが望ましい。Level 3 モデルでは、少なくとも温度分散の予報式が増えるが、計算負荷の増加は寡少である。今後、3つめの欠点、すなわち3次元モーメントのパラメタリゼーションの検討を行うとともに、予報モデルでの検証を進める予定で

ある。

参考文献

Nakanishi, M., 2001: Improvement of the Mellor-Yamada turbulence closure model based on large-eddy simulation data, Bound.-Layer Meteor. (in press)

10. 総合討論

木村富士男 (筑波大学)

総合討論ではまず研究者に公開する方針が発表された2つの非静力学平衡モデル、気象研究所/数値予報課統一非静力学モデルと CRESS についていくつか質疑が行われたあと、今後のメソモデルの発展の方向に関する議論が行われた。

まずモデルのコーディングについては、プログラムの並列化においては雲過程など、領域内で計算負荷が均一でなく、しかも変動する場合の並列計算効率化について技術的な問題がいくつかあること、モデルを共用化するときに有効と考えられるコードの標準化や FORTRAN77と90の特性の違いなどに関心が集まった。

サブグリッドのパラメタリゼーションについても活発に議論された。乱流に関しては large eddy simulation の有効性に関する議論や、将来雲の内部における乱流パラメタリゼーションについて新しいアイデアが必要になるのではないかという意見が述べられ、雲物理のパラメタリゼーションに関してもビンモデルとバルクモデルの将来性や使い分け等についての意見交換が行われた。

メソモデルにおけるデータ同化の重要性については、集まった研究者の多くの認識が一致するところであり、また海外に比べて我が国の研究が遅れているとの認識もある。今後は気象庁と大学/国立研究機関等との研究交流の一層の推進が望まれる。

まもなく大気大循環モデルを含めて多くの数値モデルは非静力学平衡に移行すると考えられること、我が国でも研究者のコミュニティとして共有できるメソスケールモデルがごく最近になっていくつも提案されたことから、我が国のメソモデルの研究は新たな段階に入ったと考えられる。これを機にメソ気象研究者の交流を一層深める必要があるとして討論を終了した。