非静力正 20 面体大気モデル NICAM の開発の現状と全球雲解像実験

佐藤正樹 (東大気候システム研究センター/JAMSTEC 地球環境フロンティア研究センター) satoh@ccsr.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

地球環境フロンティア研究センターと東京大学気候システム研 究センターにおいて共同で進めてきた非静力学正 20 面体大気モ デルNICAMの現状と課題について報告する。NICAMの開発は2000 年頃から進め、2004年に地球シミュレータを用いて理想的な水惑 星条件下での3.5kmメッシュでの「全球雲解像実験」を実施した。 さらに、現実的な海陸分布・地形を導入した実験をすでに実施し ている。

実験には、次のような2方向からアプローチしている:

 短期積分:現実的な初期値を与えて1週間程度の短い時間の 実験。Deterministic な実験である。

② 長期積分:7月条件に固定し、100日以上の積分を行い、気候 場を得る。ある程度、統計的な平衡状態を得る。

①については、地球フロンティア三浦研究員が担当し、②については伊賀研究員が担当した。

2. 実験概要

現実的な海陸分布のもとで、2004年4月1日00UTCのNCEP 客観解析データを初期値として与え、全球3.5km格子モデルで1 週間積分した。初期値は1°×1°間隔のデータで、モデルの格 子より非常に粗い。しかし、最初の数時間で対流運動が活発化し、 熱帯域では現実にみられるような積雲クラスターが組織化する。 図は積分を開始後5日目(4月6日00UTC)の雲画像(外向き赤 外放射OLR)である。左には、同時刻の静止気象衛星GOES-9の 赤外画像を示す。モデルの結果では、衛星写真と同様に、日本の 南方に台風(台風1号 Sudal)が発達しており、ほぼ観測されて いる中心示度を示している(Miura et al., 2006)。



図1:左:GOES-9 による2004年4月6日 00:00 UTC の赤外画 像。右:3.5km メッシュ実験での4月6日 00:00 UTC から01:30 UTC で平均した外向き赤外放射(OLR)。Miura et al. (2006)。

3. 最近加えられた改良点について

昨年度から今年度にかけて、海陸分布・地形を導入した 3.5km メッシュ全球雲解像実験を開始した。モデルの結果の妥当性をさ まざまな観点から調べ、改良を加えている。

我々は全球雲解像モデルを気候研究に用いることを念頭に開発 を進めている。そのためは2つの乗り越えるべき課題があった。 一つは、雲解像モデルを全球に拡張することと、もう一つは積分 を長期間安定に実行することである。第一の課題は、正20面体格 子などダイナミカルコアの開発によって対応した(Tomita et al., 2001,2002,JCP)。第二の課題については、質量やエネルギーを 保存する非静力スキームを開発したことがあげられる(Satoh 2002,2003,MWR)。しかし、これらのスキームは計算の安定性を 保証するものではない。特に、地形を導入した現実条件下の全球 雲解像実験を実施するにあたって直面した困難は、長期積分に脆 弱なことであった。富田研究員、伊賀研究員を中心に、次のよう な改良を加えることで、安定な計算を行うことが可能になった:

- 地形を工夫した:GTOP030 を用い、地形の勾配が急な場所 ほど平滑の度合いが大きくなるような非線形フィルター を開発した。
- 時間積分を2次のRunge-Kuttaから3次のRunge-Kutta に変更した。ただし、後述のN2-limiterを導入した場合 には2次RKでも積分可能である。
- 4次の数値拡散の係数に温度勾配の依存性を導入した。これにより、通常の場所では、従来よりも小さな係数を用いることができるようになった。逆転層が発達して不安定化の要因になる場所で大きな係数を与えることになる。
- 上層のダンピングの工夫:上端をrigid lid で蓋をしている。上端での重力波の反射をダンプするための数値拡散として、Laplacian型の数値拡散を用いた。東西風の強度をモデル内で決めさせるためには、Rayleigh dampingを用いたくなかった。高度 20km 以上で拡散係数を大きくしている。
- 乱流過程の計算ステップ:乱流過程は1タイムステップの どこの段階で計算するかが安定性に寄与する。また、乱流 過程だけを、さらに細かい時間分割を用いる必要がある。
 特に、逆転層の強度をモニターしながら、時間分割数を決めることとした。
- N2-limiter: 計算を安定に進めるためのキーは逆転層を うまく制御することである。逆転層ができると、物理的な 鉛直拡散は非常に小さくなり、シアの発達を弱める機構が 働かなくなる。物理的な鉛直拡散の計算の安定度に limiterを加えることで、逆転層に伴うシアの発達を弱め ることができた(伊賀研究員による)。
- 三浦研究員が開発した移流スキーム(Miura 2004)を水蒸気 などのスカラー場に導入。これは、安定性に寄与するだけ でなく、計算時間も短くなった。

3.5kmメッシュモデルでの時間ステップは20秒である。

物理過程については、次のような改良を加えた。

- 乱流過程:現状は、Mellor and Yamada のレベル2を使っている。湿潤過程の扱いに整合性がとれていないので、野田研究員を中心に改良を進めている。2.5,3の導入も予定している。全球雲解像実験の結果は、乱流過程に大きく依存する(Miura et al., 2006)。
- ・ 放射過程:ISCCP シミュレータの導入(對馬、伊賀研究員)。
- ・ 雲物理過程:標準的には、Grabowski(1998)による簡略化した雲物理スキームを用いている。雪が氷に比べて多いという問題があったが、雪の落下速度を調整することで対応している。飽和水蒸気量の計算方法を見直し、また他に重要な変換項を加え、インパクトを調べている。

また、メソモデル用の積雲パラメタリゼーションについては、導入を検討している(CCSR 柳瀬氏)。エアロゾルの効果については、 SPRINTARSを導入し、計算を実行している(CCSR 鈴木氏)。また、 NICAMの移流スキームがCWCをもつフラックス形式である利点を 生かし、輸送モデルとしての利用も始めている(CCSR 丹羽氏)。

4. モデル開発の課題

5km メッシュ以下モデルを「雲解像」とよぶのであれば、全球 雲解像実験を実施することは、いくら地球シミュレータを利用す るといえども、そうたやすいことではない。そこで我々は、モデ ルの改良のために、以下のようなアプローチをとっている。

- 小惑星実験:地球半径を小さくし、回転なし、地表面条件 一様のもとで計算。領域モデルの2重周期境界条件に対応 し、たとえば西太平洋 warm pool などの状況を想定した実 験である。回転がないので、C. Bretherton らの DARE とは 異なる(Kuang et al. 2005)。放射対流平衡実験を行い、 雲物理依存性などを調べている。
- stretched 格子モデル:正20面体格子を一部に集中化し、 領域モデルとして利用。理想化した squall line 実験な ど行った。今後、現実的な地形のもとでも利用できるよう 改良を進めている。
- 粗い格子実験:メッシュサイズ7km、14kmのもとで、3.5km メッシュ実験と同一の物理過程を使った実験を行う。

特に、最後の点について例を示す。一般に、雲解像モデルでは、 格子のサイズを大きくすると、積雲の発達が遅く、いったん雲が できると強く発達しすぎるという傾向があることが知られている。 特に、数値予報でも、メッシュサイズ5km以上では、一般に格子 スケールの雨が強く降り、メソパラメタリゼーションを導入しな ければ再現がよくならないということが知られている。しかし、 我々の経験によると、領域が全球にわたる実験では、7km、14km メッシュの結果の"ある部分"は3.5km メッシュの結果に似てお り、「全球雲解像実験」として利用できることがわかってきた。図 2は、図1と同じ短期積分実験について、メッシュサイズ3.5km、 7km、14km の結果である。台風や積雲クラスターなどの大規模ス ケールの積雲のパターンがよく似ていることがわかる。全球雲解 像モデルは、積雲に伴うメソ循環(上下運動)をあらわに計算す ることにより、その大規模場に対する統計的効果が表現できてい ると考えられる。14km メッシュでも、積雲クラスターの中に十分 な数のメソ循環が含まれていれば、3.5km メッシュと似たような 大規模場の性質を示しているのであろう。



図2: 左から、3.5km、7km、14km メッシュ実験。図1と同じ実 験、同時刻の平均した外向き赤外放射(OLR)。

5. 気候感度問題

Miura et al. (2005) は、7km メッシュ水惑星実験によって、地 表面温度に対する雲の感度を調べた。その結果、SST が高い条件 では、高緯度域でアルベドが高くなり、従来型 GCM と逆の傾向が あることを指摘した(図3)。Wyand etal. (2006)の MMF の結果で も同様な傾向が報告されている。Miura では、雲解像モードにな ってようやく表現できる低気圧後面の比較的背の低い積雲がこれ らの要因であるだろうと指摘している。ところが、詳しく解析す ると、高緯度での低気圧の閉塞後の高い雲がこれらのアルベドに 寄与していることがわかった。ところで、これらの閉塞前線に伴 う雲は、従来型大気大循環モデル(6CM)でも表現可能な雲である。 従来型 GCM と全球雲解像モデルの雲の表現方法の相違が、感度の 相違をもたらしている可能性がある。



図3: 水惑星実験のアルベドの緯度依存性。実線コントロール、 破線+2K 実験。Miura et al. (2005)。



図4:水惑星実験+2K実験、67日目のアルベド分布、南極から 見た図。矢印示した雲が低気圧の閉塞に伴うもの。

6. まとめ

NICAM も感度実験などは14km メッシュである程度の傾向がつか める。メッシュサイズが10km 程度では、非静力学効果が重要では なく、また従来型 GCM でも到達可能な解像度である。この解像度 のモデルは、計算資源的にも"比較的"軽いものであり、GCM と 全球雲解像モデルが比較可能である。

世界的には、いくつかの研究機関が全球雲解像モデルの開発を はじめており、5年以内に多くの結果が現れてくると思われる。 我々は地球シミュレータのアドバンテージを生かすべく、NICAM の開発・利用を推進していく必要があると考えている。特に、5 年後の京速計算機時代では、さらなる高解像度、高度な物理過程 の導入が可能となると考えられる。

参考文献

- Miura, H. et al., 2006: A short-duration global cloud resolving simulation under a realistic condition, *Geophys. Res. Lett.*, submitted.
- (2) Kuang, Z. et al. 2005: A new approach for 3D cloud-resolving simulations of large-scale atmospheric circulation, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L02809, doi:10.1029/2004GL021024.
- (3) Wyant, M., et al. 2006: Climate sensitivity and 280 cloud response of a GCM with a superparameterization, *Geophys. Res. Lett.*, 33, 281 L06714, doi:10.1029/2005GL025464.
- Miura, H. et al., 2005: A climate sensitivity test using a global cloud resolving model under an aqua planet condition. *Geophys. Res. Lett.* 32, L19717, doi:1029/2005GL023672.