

# 全球雲解像モデルによる現実的気象場の再現実験

三浦裕亮(海洋機構・地フロ)・佐藤正樹(東大・CCSR)

## 1. はじめに

一般に、水平格子間隔数キロ以下で用いられ、雲微物理計算を陽に行う気象モデルは、雲解像モデルと呼ばれる。そのような詳細なモデルの利用は、計算速度の制約から狭領域・短期間に限られてきた。しかしながら、近年の計算速度の向上に伴い、雲解像モデルを全球計算に用いようという試みが行われつつある。

そのような試みの1つとして、Grabowski et al.(1998)や Khairoutdinov and Randall(2001)のスーパーパラメタリゼーション(あるいは、マルチスケールモデリング)が挙げられる。スーパーパラメタリゼーションでは、雲解像モデルを既存の大気大循環モデル(AGCM)に埋め込み、AGCMの格子内スケールの現象を、雲解像モデルが表現すると考える。もう1つの試みは、我々が行っているような、全球で雲を直接計算する全球雲解像モデルの開発である。

雲解像モデルの全球利用により、Tomita et al.(2005)や Khairoutdinov et al.(2005)が示したように、熱帯における雲の大規模な組織化が現実的に再現されるのではないかと期待される。また、温暖化時の雲の変化について、既存のAGCMに比べてより詳細な議論が可能になると見込まれ、Miura et al.(2005)と Wyant et al.(2006)が、それぞれ全球雲解像モデルとスーパーパラメタリゼーションを用いた初期的な試みを行っている。

雲解像モデルの利用により、熱帯の季節内振動の再現性や温暖化時の雲の変化の信頼性が、格段に改善されるのではないかと期待の一方で、スーパーパラ

メタリゼーションや全球雲解像モデルは未だ開発途上であり、計算結果の検証やモデル特性の把握は重要な課題である。例えば、我々のモデルに関しては、Tomita et al.(2005)が行った水惑星実験において、既存のAGCMと比べて熱帯での雨が過大評価されており、また、水平格子間隔への依存も明瞭に見られた。

水惑星実験のような理想的実験は、大気変動についての科学的理解には重要であるが、実験を通したモデル結果の現実性の検証は困難である。そこで、我々は、海陸分布を取り入れた短期の現実的気象場の再現実験を行い、モデル結果と観測結果を比較することで、モデル特性の把握、および将来的なモデルの改良を目指すこととした。全球雲解像実験は、現在の計算速度では繰り返し実験を行うことが難しく、モデル特性の理解は直感的なものとならざるを得ない。しかしながら、このような方法が現段階において選択し得る有効な取組みのひとつであろうと考えている。

## 2. 実験設定

実験に使用したモデルは、地球環境フロンティア研究センターの全球雲解像モデルである。モデルの仕様については、水惑星実験の結果を報告した Tomita et al.(2005)に簡単にまとめられている。水惑星実験からの拡張として、地表面モデルには簡単なバケツモデルを用いた。地形を取り込むのに、地形に沿った鉛直座標を採用した。また、乱流スキームに湿潤効果を取り込むべく、Mellor-Yamada level-2 乱流スキーム中におけるバルクリ

チャードソン数の計算に Smith(1990)の方法を用いるように変更してある。

実験に用いた水平格子間隔は約 3.5 km で、深い対流雲については現実的に表現することが可能であると考えられる。鉛直層数は 40 で、格子間隔が地表面付近は 160 m、モデル上端(約 38000 m)付近で 3000 m となるような不等間隔格子を用いている。高度 2 km 以下の層数が 9 層と、大気境界層を表現するには不十分であると思われるが、これは計算機のメモリの制約による。計算の時間間隔は 12 秒で、大気放射を除く物理過程は毎ステップ計算を行った。計算負荷を抑えるため、大気放射による強制項は 5 分ごとに更新した。雲の成長や移流の効果を表現するには不十分である(Xu and Randall 1995)が、個々の雲の発達・衰弱の過程を解析する段階には無いため、現時点では問題ないと考えている。

実験の初期条件は米国環境予測センター(NCEP)の全球大気解析データ(ds083.2)から内挿による作成した。与えた初期条件は 2004 年 4 月 1 日 0 時(UTC)のものである。積分期間は 7 日で、実験期間における解析データへのナッジングは行っていない。海面温度(SST)は NCEP Reynolds Optimal Interpolated SST から作成した。

### 3. 実験結果

初期条件を  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  の解析データから内挿により作成したにも関わらず、積分開始から数時間で対流雲ができ始め、最初の数日間は現実的な雲分布が計算される。図 1 を見ると、積分 5 日後においても、計算された雲の空間分布は観測された雲の分布と似通っている。特に中緯度において、温帯低気圧に伴う雲の再現性が良いように思われるが、これは、前線を解像するのに十分細かい格子間隔であること、また、細かい格子を用いたこと



図 1: (上) 2004 年 4 月 6 日 0 時(UTC)における GOES-9 で観測された等価黒体温度。(下) 2004 年 4 月 6 日 0 時-1 時 30 分(UTC)に相当する計算された外向き長波放射の 90 分平均。

で水蒸気移流の表現が正確になることによると考えられる。

熱帯においてはフィリピンの東方海上に台風 0401(SUDAL)に相当する熱帯低気圧が再現されている。台風を中心気圧の深まりが早く、進路は北東にずれるものの、中心気圧の最低値については 942 hPa と、観測された値に近い。

計算結果には、上記のような現実に対応する部分がある一方で、特に熱帯において、非現実的な振る舞いをしているこ

とが分かる。図2を見ると、台風0401に対応する熱帯低気圧について、目の壁雲に伴う強雨や目の南西側の弧状の降水帯が再現されている。しかしながら、現実には存在しない、幾つかの熱帯低気圧が発生してしまっている。このような非現実的な雲の組織化について理解するべく、追加実験を行った。結果については次節で議論する。

#### 4. 乱流スキームの影響

上記の実験で用いた乱流スキームにおいては、格子内に凝結物質が  $10^{-10}$  kg/kg 以上存在する時に雲が存在していると判定し、相当温位を用いて鉛直安定度を評価していた。 $10^{-10}$  kg/kg という非常に小さな値を閾値として用いたために、熱帯の格子のほとんどが雲で覆われていると判定され、境界層から自由大気への水蒸気輸送が過大評価されてしまった。

循環を陽に表現することなく、格子内で対流不安定を解消してしまったことで、放射対流平衡状態に歪みが生じ、雲の極端な組織化が起こったように思われた。すなわち、局所的なメソスケール循環が不自然に抑制されてしまったため、放射冷却との均衡から大規模循環が強化され、その際、すでに対流活動が活発な領域を上層への空気塊輸送の通り道としたのだと考えられた。

このような仮説を検証する試みとして、水平格子間隔約 14 km の格子を用いた2つの追加実験を行った。1つ目は、水平格子間隔約 3.5 km の実験と同じ物理過程を用いた実験で、DX-14M とする。もう1つは、水惑星実験と同じ乱流スキームを用いた実験で、DX-14D とする。積分の時間間隔は 30 秒で、積分期間はいずれも 10 日である。その他の設定は水平格子間隔約 3.5 km の実験と同様である。水平格子間隔は約 14 km と粗いが、積雲パラメタ

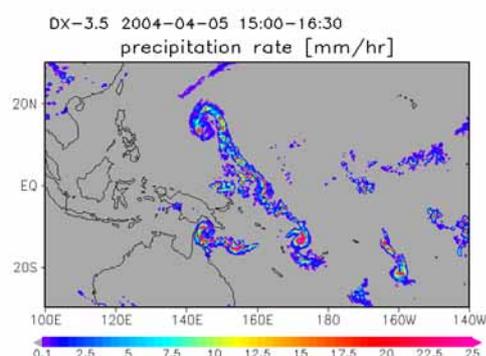
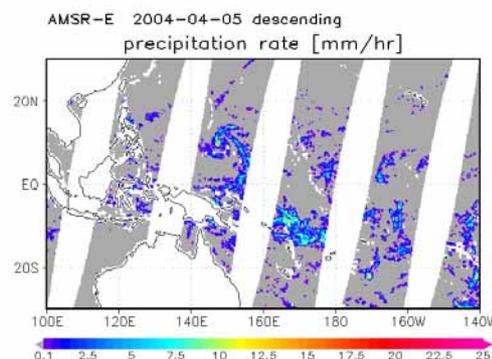


図2: (上) 2004年4月5日に AMSR-E の descending path で観測された地表面降水量。(下) 2004年4月5日 15時-16時30分(UTC)に相当する計算された地表面降水量の90分平均値。台風0401周辺での観測時間と下図の時間がほぼ一致する。

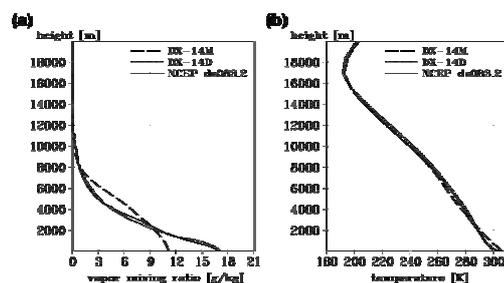


図3: 2004年4月1日-10日の10°S-10°Nで平均した(a)水蒸気と(b)温度の鉛直分布。

リゼーションは用いない。図3から、DX-14M では水蒸気の鉛直輸送が過大評価され、境界層が極端に乾いていたこと

が分かる。温度の鉛直分布も乱流スキームの違いに影響を受けている。

図4を見ると、DX-14Mでは水平解像度約3.5 kmの実験と同様に、雲の組織化が過大評価され、熱帯低気圧が発生し過ぎていることが分かる。逆に、DX-14Dでは、インドネシアなどで現実的な対流の日周期が表現されるようになった一方で、台風0401を含め、雲の組織化が不十分である。DX-14Dで見られる個々の雲が大きく、あまり組織化しないという問題は、格子間隔が粗いと熱と水蒸気の鉛直輸送

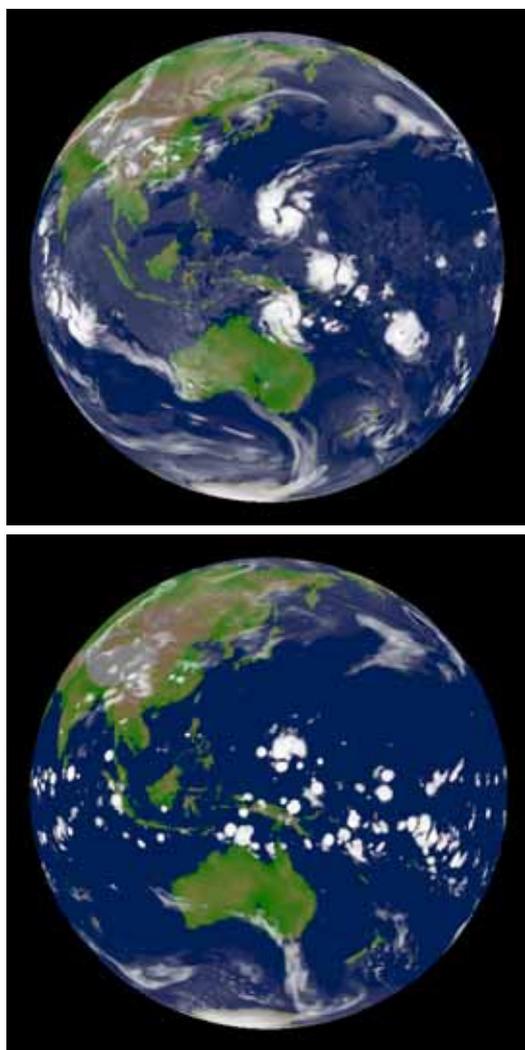


図4: 2004年4月6日0時-1時30分(UTC)に相当する計算された外向き長波放射の90分平均。(上)DX-14M。(下)DX-14D。

が水平サイズの大きな雲により表現され、メソスケール循環が過大評価されてしまうという、粗い解像度を用いた雲解像実験の特性によるものと考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、全球雲解像モデルの検証・改良を目指して、現実的な実験を行った。水平格子間隔約3.5 kmの実験では、特に中緯度において、現実的な雲の空間分布を表現でき、また、台風0401に相当する熱帯低気圧が再現された。しかしながら、現実には存在しないような熱帯低気圧がいくつも計算され、雲の組織化が過大評価されてしまった。

過度な雲の組織化の原因としては、乱流スキームの不具合により格子内スケールで対流不安定が解消されてしまい、放射対流平衡が歪んでしまったことが考えられた。水平格子間隔約14 kmの2つの追加実験により、積雲パラメタリゼーションによって現実的な温度・水蒸気の鉛直分布が保証されない雲解像実験においては、乱流スキームがメソスケール循環と大規模循環の釣り合いに影響を与えることが示唆された。

今後は、乱流スキームの改良を行っていくとともに、他の数値スキームを含めてモデルの高度化に取り組む必要がある。また、中緯度の温帯低気圧の振る舞いについても、どの程度現実的に表現されているか検証を行っていきたい。

## 謝辞

本研究の計算には海洋研究開発機構の地球シミュレータを使用した。GOES-9データは高知大学気象情報項より、AMSR-Eデータは[www.remss.com](http://www.remss.com)より取得した。作図にはOpenDX、GrADS、gnuplotを使用した。

### 参考文献

- Grabowski, W. W. (2001), Coupling cloud processes with the large-scale dynamics using the cloud-resolving convection parameterization (CRCP), *J. Atmos. Sci.*, 58, 978–997.
- Khairoutdinov, M. F., and D. A. Randall (2001), A cloud-resolving model as a cloud parameterization in the NCAR Community Climate System Model: Preliminary results, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3617-3620.
- Khairoutdinov, M., D. Randall, and C. DeMott (2005), Simulations of the atmospheric general circulation using a cloud-resolving model as a superparameterization of physical processes, *J. Atmos. Sci.*, 62, 2136–2154.
- Miura, H., H. Tomita, T. Nasuno, S. Iga, M. Satoh, and T. Matsuno (2005), A climate sensitivity test using a global cloud resolving model under an aqua planet condition, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L19717, doi:10.1029/2005GL023672.
- Smith, R. N. B. (1990), A scheme for predicting layer clouds and their water content in a general circulation model, *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.*, 116, 435–460.
- Tomita, H., H. Miura, S. Iga, T. Nasuno, and M. Satoh (2005), A global cloud-resolving simulation: Preliminary results from an aqua planet experiment, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L08805, doi:10.1029/2005GL022459.
- Wyant, M., M. Khairoutdinov, and C. S. Bretherton (2006), Climate sensitivity and cloud response of a GCM with a superparameterization, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L06714, doi:10.1029/2005GL025464.
- Xu, K.-M., and D. A. Randall (1995), Impact of interactive radiative transfer on the macroscopic behavior of cumulus ensembles. Part I: Radiation parameterization and sensitivity tests. *J. Atmos. Sci.*, 52, 785–799.