

地球フロンティア次世代モデル非静力学コアにおける 湿潤対流の乱流モデル依存性

佐藤 正樹 (地球フロンティア研究システム/埼玉工業大学)

1. はじめに

地球フロンティアでは、非静力学方程式に基づく正 20 面体格子を用いた次世代大気大循環モデルの開発を進めている。このモデルは水平分解能 10km 以下の高分解能で気候計算を行うことを目標としている。次世代モデルのサブモデルとして、浅水波方程式系モデルや領域非静力学モデルの開発を同時に進めている (Tomita et al. 2001; Satoh 2002a)。領域非静力学モデルは、周期境界条件の Cartesian 座標系に基づいており、 $X-Z$, $X-Y$ slice モデル、鉛直・水平 1 次元モデルとして用いることが可能であり、特に、次世代モデルで用いるべき物理過程の検討を行うために利用することを考えている。本稿では、スコールライン実験を通して乱流モデルの依存性について調べた結果を紹介する。Satoh(2002b) では降水変動が、数値拡散や time-splitting に大きく依存することを述べた。これらの人為的な依存性が、乱流モデルによってどう制御されるかが問題意識である。

2. モデルおよび実験設定

非静力学方程式系の支配方程式は、完全圧縮性の非静力学方程式系であり、全密度 ρ 、水の各質量密度 ρq_i 、運動量の 3 成分 ($\rho u, \rho v, \rho w$)、内部エネルギー ρe を予報変数とする。音波、重力波に関係する項を短い時間ステップ $\Delta\tau$ 、その他の遅い項、物理過程を長い時間ステップ Δt で計算する time-splitting 法を用いる。鉛直伝播する音波に関する項、浮力項について陰的に扱い、水平伝播については eulter-backward 法を用いる。長い時間ステップの積分は、leap-frog 法を用いる。time-splitting の時間分割数を、

$$N_s = \frac{2\Delta t}{\Delta\tau}, \quad (1)$$

と表す。雲物理として bulk 法に基づく warm rain scheme を用いており、水物質としては、水蒸気、雲水、雨水を考える。空間差分は、水平方向に C-grid、鉛直方向に Lorenz grid を用いており、移流は 3 次の上流差分、その他の差分表現には 2 次の中央差分を主として用いている。数値的なスムージングとしては、時間方向の time-filter、time-splitting に伴う不安定を抑制するための divergence damping、上部 1/3 層に Rayleigh damping、および 4 次の数値拡散を導入している。拡散係数 K は、無次元化すると、

$$\gamma \equiv \frac{K\Delta t}{\Delta x^4}, \quad (2)$$

と表される。強い数値拡散 $\gamma = 0.015$ を標準として用いるが、比較のために弱い拡散 $\gamma = 0.0002$ の場合も示す。

乱流過程として、100m-10km の水平分解能をまでの広いレンジの計算を念頭に、LES 法、アンサンブル平均に基づくスキームを試みている。すなわち、成層の効果を考慮した Smagorinsky スキーム、乱流の運動エネルギーの予報式を用いる Deardorff スキーム、および、Mellor-Yamada の level 2 スキームである。master length は

$l = \kappa z / (1 + \kappa z / l_0)$ の形に与えるが、Deardorff では安定の場合に $l_0 = \max(0.76k/N, \Delta z)$ とした。水平拡散係数に関しては、 $l_0 = \Delta x$ とする。Mellor-Yamada では水平拡散係数はゼロである。

実験設定は、Redelsperger et al.(2000) のスコールライン実験をもとにした。本研究では、さまざまなパラメータ依存性をみるために、計算資源を節約できる 2 次元の 100km の周期境界条件を用いる。格子間隔は $\Delta x = 1.25\text{km}$ 、鉛直方向は 44 層である。このように狭い領域幅だと、最初の雲が成長するだけで、スコールラインは長続きしない。

3. 実験結果

図 1 には、全降水量の時間変化の N_s と γ に対する依存性を示す。実線は乱流モデルを用いない場合、点線は Deardorff scheme を用いた場合の結果である。time-split なし ($N_s = 1$) の場合、(a) $\gamma = 0.0015$ と (b) $\gamma = 0.0002$ とを比較すると、(b) では時間発展の後半にスパイク状の降水振動がみられる。次に、 $\Delta\tau$ 一定で time-splitting を行い $N_s = 4$ とすると、 $\gamma = 0.0015$ 一定のままの場合だと (c) のように (a) に比べて降水量がかなり増加する。これに対して、数値拡散を Δt に比例して取り $\gamma = 0.06$ とすると (すなわち、次元のある拡散係数 K が一定)、(d) のようになり、降水の変化パターンは (a) によく似てくる。このような数値拡散、time-splitting の効果は人為的なものであり、乱流モデルの導入によって依存性が取り除かれるべきであると考えられる。しかし、いずれの実験でも Deardorff の導入した場合は非常に小さい。小さい拡散の (b) の場合のみ、振動の様子に変化が現れる。したがって、これらの人為的なパラメータ依存性の方が大きく、乱流モデルは効果的に働いていないことがわかる。ちなみに数値拡散なしで Deardorff scheme だけではモデルは走らなかった。

図 2 は Mellor-Yamada Level 2 scheme, Smagorinsky を用いた結果を示す。いずれも $\gamma = 0.015$ である。Mellor-Yamada については $l_0 = 50\text{m}, 300\text{m}$ を比較する。いずれも、変化傾向は図 1 (a) とほぼ同様であるが、Mellor-Yamada では降水量が多くなっている。特に、 $l_0 = 300\text{m}$ の場合はスムージングされているが、降水量は $l_0 = 50\text{m}$ の場合とほぼ同程度である。Smagorinsky ではさらに平滑化されて、降水量も少なくなっている。図 3 は、これらの乱流モデルの $t = 50\text{min}$ における鉛直拡散係数の分布を示す。(a) には雲水の存在域を示すが、いずれのモデルも雲水の上辺部で拡散係数が大きくなっている。Mellor-Yamada では下層にも拡散係数のピークがある。拡散係数の大きさは、 l_0 にほぼ比例すると考えられる。 $l_0 =$ (b) 50m の場合が Deardorff の結果と大きさはほぼ一致を示している。

最後に、高分解能の $\Delta x = 125\text{m}$ とした場合の結果を図 4 に示す。この分解能では、 $\gamma = 0.015$ でも乱流モデルを導入しなければモデルは走らなかった。図 4 は Deardorff scheme を用いた結果である。降水変動 (a) には大きな振動がみられ、特に初期の立ち上がりが大きい。この初期の発達は弱い数値拡散 (b) の場合に似ている。

5. まとめ・課題

一般的には数値拡散は小さい方がよいと考えられるが、それでも乱流モデルの効果は限定的である。乱流モデル、数値拡散の妥当性は、高分解能実験との比較で判断すべきものである。本実験では $\Delta x = 1.25\text{km}$ では弱い拡散 $\gamma = 0.002$ の方が適当であると考えられる。他の分解能や3次元実験でのスペクトル解析が課題である。

引用文献

Tomita, H. et al. (2001): *J. Comp. Phys.*, **174**, 579-613.
 Satoh, M. (2002a): *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 1227-1245.
 Satoh, M. (2002b): *Mon. Wea. Rev.*, in revision.
 Redelsperger, J.-L. et al. (2000) *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **126**, 823-863.

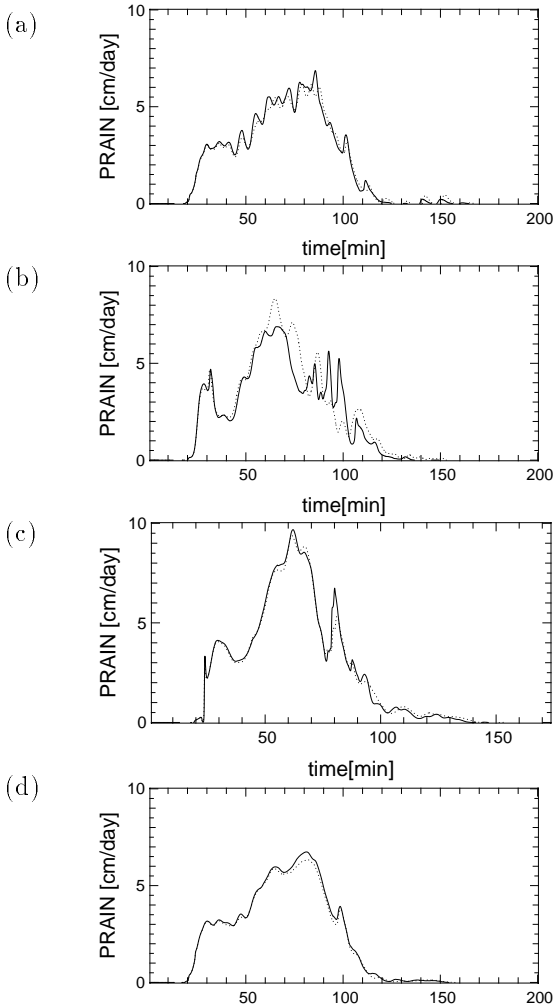


図 1: 降水量の時間変化. 上から, (a) $N_s = 1, \gamma = 0.015$, (b) $N_s = 1, \gamma = 0.002$, (c) $N_s = 4, \gamma = 0.015$, (d) $N_s = 4, \gamma = 0.06$. 実線: 乱流モデルなし, 点線: Deardorff scheme.

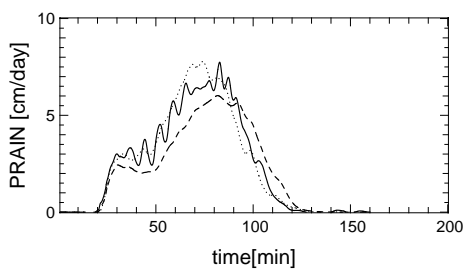


図 2: 降水量の時間変化. Mellor-Yamada Level2, $l_0 = 50\text{m}$ (実線), 300m (点線); Smagorinsky (破線).

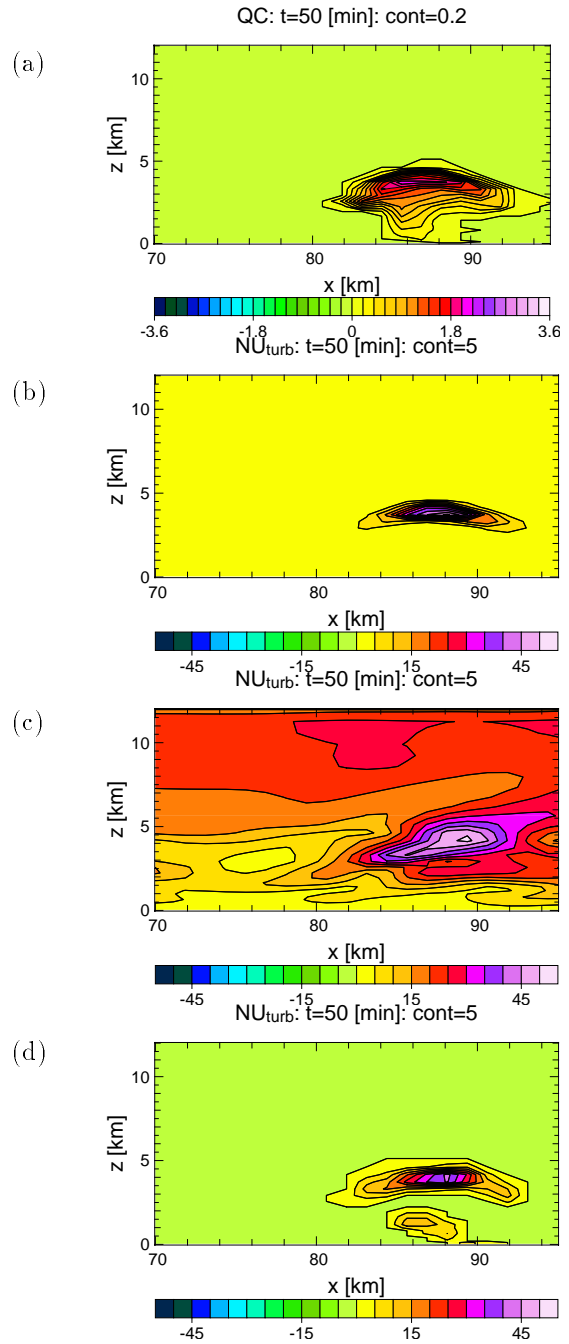


図 3: 上から $t = 50\text{min}$ における (a) 雲水量の分布, 鉛直拡散係数の分布: (b) Smagorinsky scheme, (c) Deardorff scheme, (d) Mellor-Yamada Level2, $l_0 = 50\text{m}$. 等値線間隔 $0.2 \text{ g kg}^{-1}, 5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

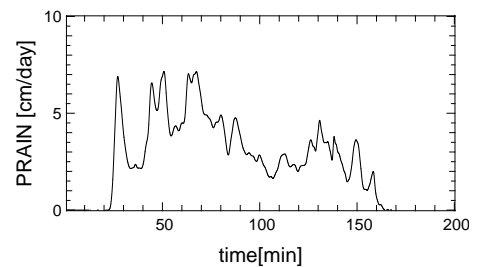


図 4: $\Delta x = 125\text{m}, \gamma = 0.015$ の場合の降水量の時間変化.