100 m 解像度の領域モデルによる積雲対流のブリーディング実験

1 はじめに

近年、スーパーコンピュータ京をはじめとす る高速計算機の発展により、水平100m程度の解 像度での領域大気モデル計算が容易になってき た。また、フェーズドアレイ気象レーダのような 観測技術の高度化により、水平100m、時間間隔 30 秒程度の高い時空間密度を持った観測が可能 になってきた。これらを組み合わせることによ り、水平解像度100m程度の積雲対流スケール でのデータ同化が可能になりつつある。一方で、 既存の対流スケールでの予測可能性研究は数km 程度の解像度で行われている (例えば Leoncini et al., 2010; Melhauser and Zhang, 2012; Keil et al., 2014)。100 m スケールでの予測可能性は 新しい問題であり、100 m 解像度、30 秒毎の観 測データによって積雲対流がどのように予測で きるかは自明ではない。このスケールでの予測可 能性の理解は高解像度数値天気予報の設計に本 質的な役割を果たす。本研究では水平解像度100 m、30秒サイクルのブリーディングサイクル実 験を行い、対流スケールでの予測可能性を調べ る。なお、本講演要旨には Otsuka and Miyoshi (2014, 投稿準備中)の抜粋・図表が含まれる。

# 2 実験設定

本研究では領域大気モデル Advanced Research Weather Research and Forecasting (ARW-WRF) model V3.6 を使用した (Skamarock et al., 2008)。水平解像度は 62.5 km, 12.5 km, 2.5 km, 500 m, 100 m の 1-way 多 重ネストとした (図 1) 。 雲微物理に singlemoment 6-class スキーム、境界層に Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino (MYNN) Level3 ス キーム、放射は Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) 及び Dudhia スキームを用いた。実験 設定を表1に示す。62.5 km 解像度の計算開始時 刻は 2013 年7月 13 日 0900 JST (0000 UTC) と



大塚成徳・三好建正(理研・計算科学/JST CREST)

図 1: 計算領域および地形。Otsuka and Miyoshi (2014) より。

した。本実験では1500 JST 前後に京阪神地区で 観測された局地的豪雨を対象に、モデルで再現 された積雲対流周辺の誤差成長を調べる。コン トロール実験として、National Center for Environmental Predictions (NCEP) Final Analyses (FNL)を初期値・境界値として62.5 km 解像度の 計算を行い、そこから5重ネストで100 m 解像 度までダウンスケールする。それに対し、100 m 解像度計算の場に擾乱を加えて時間積分を行っ た物をコントロールランと比較する。

## 3 結果

### 3.1 コントロールラン

モデル中では昼前より中国山地東部を起点とし て線状降水帯が発達し、その後南東進して1200-1400 JST (0300-0500 UTC)に京阪神地区で降 水の極大を迎える。図2はコントロール実験の 100 m 解像度での降水分布を示す。モデル中で は観測より早めに降水が見られるが、降雨強度

表 1: モデル設定。

dx (km)	dt (s)	格子点数	積雲	初期時刻
62.5	180	$41\times41\times30$	Kain Fritsch	$7/13\ 0000\ { m UTC}$
12.5	60	$101\times101\times30$	Kain Fritsch	$7/13\ 0000\ \mathrm{UTC}$
2.5	15	$201\times 201\times 88$	無し	$7/13\ 0100\ \mathrm{UTC}$
0.5	0.5	$751\times351\times88$	無し	$7/13\ 0200\ \mathrm{UTC}$
0.1	0.05	$1001\times 601\times 175$	無し	$7/13 \ 0330 \ \mathrm{UTC}$





による 1330 JST (0430 UTC) の 30 秒積算地上 5 km)。Otsuka and Miyoshi (2014) より。 降水。Otsuka and Miyoshi (2014) より。

100 mm/hr 程度の強雨が再現されている。水平 解像度 100 m に対応した構造が出るまでに 30 分 程度のスピンアップが必要なため、0400 UTC を ブリーディング実験の初期時刻として用いる。

#### 3.2ブリーディング実験

100 m 解像度のコントロールランの温位場に 摂動を加え、時間発展させる。摂動としては、波 長 1-2 km のスペクトル成分にのみ、一定の振幅 でランダムな位相を持つ場を用いる(図3)。振 幅は実空間で標準偏差が 0.1 K となるようにす る。摂動の生成は3次元的に等方な格子系を仮 定して行っているが、実際には鉛直格子間隔は 不均一のため、鉛直波長は不均一である。側面 境界付近では初期摂動が0になるようにし、境かる。また、成長率は開始後2-4分が最も大き

図 2: 100 m 解像度の WRF コントロールラン 図 3: ブリーディング実験の温位初期摂動場 (z =

&' 2013-07-13\_04:00:00

界条件はコントロールランと同じものを用いる。

ブリーディング法 (Toth and Kalnav, 1993) では、一定時間毎に全予報変数の摂動を再規格 化することを繰り返し、その時間スケールで最 も発達するモードを取り出す。摂動の規格化は、 温位摂動のL2ノルムが初期の大きさを越えた場 合、初期の大きさと同じになるように行う。摂 動の規格化間隔としては、30秒、1分、5分を用 いる。摂動を規格化せず、自由に発達させる実 験も行う。100 m 解像度のコントロールランの 開始 30 分後 (0400 UTC) に摂動を与えた。

図4に温位摂動の大きさの時間発展を示す。初 期摂動には発達しないモードも含まれるため、摂 動のL2ノルムは一旦減少するが、その後増加に 転ずる。摂動を規格化しない場合(黒)を見る と、摂動が指数関数的に成長している様子が分





図 4: 温位場のコントロールランに対する root mean square difference (z = 5 km)の時系列 (0400-0500 UTC)。摂動の規格化無し(黒)、規 格化間隔 30 秒毎(赤)、1 分毎(緑)、5 分毎 (青)。Otsuka and Miyoshi (2014) より。

く、開始後 6-14 分、それ以後と、2回に渡って 成長率が減少する様子が見える。摂動を規格化 した場合、規格化間隔に関わらず、いずれも摂 動が規格化後に再び成長している。よって、成長 するモードが抽出されていると考えられる。成 長モードの成長率は背景場に依存し、時間変動 が見られる。また、30 秒毎と1分毎に規格化し たものは、成長率の時間変動が類似しているこ とが分かる。

次に、30秒毎に規格化した摂動場の空間構造 (ブレッドベクトル)を見る。図5は摂動を加え てから30分後の高度5kmにおける温位摂動で ある。図2と比べると、降水域の上空に摂動が 見られることが分かる。摂動は主に水平スケー ル1km以下の微細なフィラメント状の空間構 造を持ち、リング状を示すものも見られる。図6 にリング状の摂動付近の拡大図を示す。左の水 平断面図を見ると、上昇流の5m/sの等値線を 取り囲むように、赤と青で示したリング状の温 位摂動場が見られる。右の鉛直断面図を見ると、 温位摂動は上昇流域の上部を取り囲むように発 達していることが分かる。このように、リング 状の温位摂動は対流コアの成長と密接に関連し 図 5: 30秒毎に規格化した実験の温位摂動場 (z = 5 km)。摂動を加えてから 30 分後 (0430 UTC)。 Otsuka and Miyoshi (2014) より。

た構造になっている。

図7は摂動の規格化間隔30秒、1分、5分の 実験における高度5kmの温位摂動を比較してい る。右下は同じ高度における鉛直流を示す。い ずれの規格化間隔でも、x = 37.5km, y = 23.5km付近に、鉛直流の強い領域を中心としたリン グ状の摂動が見られる。細かな違いはあるもの の、リング状の部分については規格化間隔に依 らず、ほぼ同じ構造を示す。広い領域で見た場 合、異なる対流コアに対応するリング状の摂動 の相対的な振幅が、規格化間隔によって異なる ことがある(図は省略)。

摂動を再規格化しない場合、摂動を与えてか ら15分まではフィラメント状の構造を示すが、 15分以後はより空間スケールの大きい構造へと 変化する(図は省略)。その際の摂動の振幅は、 摂動を規格化した場合の振幅と比べて大きく、摂 動の成長率はそれ以前に比べて小さくなる(図 4)。このことは、摂動の規格化の大きさによっ て、得られる摂動の空間構造が異なる可能性を 示す。つまり、摂動の規格化係数を大きくする と、より空間スケールの大きなブレッドベクト ルが得られる可能性がある。



図 6: 30 秒毎に規格化した実験の温位摂動場の 拡大図。左:水平断面。緑破線は鉛直断面図の位 置。右:鉛直断面。緑破線は水平断面の位置。摂 動を加えてから 31 分後 (0431 UTC)。等値線は 鉛直流。実線が5 m/s、点線が –5 m/s。Otsuka and Miyoshi (2014) より。

## 4 まとめ

本研究では水平スケール100m、時間スケー ル30秒という、従来では考えられなかった高解 像度観測データ、高解像度数値モデルを用いた 気象予測に向けて、積雲対流の予測可能性を調 べるためにブリーディング実験を行った。WRF を用いた水平100 m 解像度のコントロールラン では、2013 年 7 月 13 日に京阪神地区で観測さ れた豪雨を適切に再現した。それを用いて、ラ ンダムな摂動を与えた計算を行い、時間間隔30 秒、1分、5分で摂動の再規格化を行った。その 結果、いずれの実験においても、発達中の積雲 対流の周りにリング状のフィラメント構造が得 られた。リング状の構造は摂動の規格化間隔に はあまり依存しなかった。一方、摂動の振幅と 空間構造の間には、関連性が示唆された。今後 は初期摂動の与え方、規格化の大きさ等につい て、調査を行う予定である。

### 参考文献

Keil, C., F. Heinlein, and G. C. Craig, 2014: The convective adjustment time-scale as indicator of predictability of convective precipitation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 140, 480–490.



図 7: 30秒 (左上)、1分 (右上)、5分 (左下) 毎に規格化した実験の温位摂動場。右下:鉛直 流。いずれも z = 5 km、摂動を加えてから 31 分後 (0431 UTC)。Otsuka and Miyoshi (2014) より。

- Leoncini, G., R. S. Plant, S. L. Gray, and P. A. Clark, 2010: Perturbation growth at the convective scale for CSIP IOP18. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 653–670.
- Melhauser, C. and F. Zhang, 2012: Practical and intrinsic predictability of severe and convective weather at the mesoscale. J. Atmos. Sci., 69, 3350–3371.
- Skamarock, W. C., et al., 2008: A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR.
- Toth, Z. and E. Kalnay, 1993: Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations. Bull. Amer. Meteor. Soc., 74, 2317– 2330.