

WRF-LETKF による九州北部豪雨の数値実験

中電技術コンサルタント株式会社
広島大学大学院工学研究科
広島大学大学院工学研究科
土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター

正会員 ○北 真人
フェロー会員 河原能久
正会員 椿 涼太
正会員 牛山朋来

1. 序論

近年、地球温暖化による平均気温の上昇などの世界規模での気候変動が問題とされており、それに起因する集中豪雨も増加傾向にある。集中豪雨のような、限られた地域において短時間に多量の降雨が発生する場合、内水氾濫や外水氾濫、さらには土砂災害の発生が懸念される。このため、XRAIN のような集中豪雨を観測する手法とともに、集中豪雨を予測する手法はその重要性を増している。

降雨の予測手法は、運動学的手法と物理学的手法の2つに大別される。運動学的手法とは、レーダーによって観測された降水系の時間変動パターンを運動学的に捉えて時間的に外挿する手法である。物理的手法とは、数値モデルを積分して、物理量の変化を予測する手法である。図-1 に示すように、運動学的手法はリードタイムが1時間程度までにおいて精度が高く、それ以降になると極端に精度が落ちる。一方で、物理的手法に関しては、リードタイムが2時間以降になると予測精度が向上する。そのため、2時間程度先の降雨を予測する場合には大気モデルによる数値予報が有効となることが知られている¹⁾。

そのため、より早く集中豪雨およびそれに起因する豪雨災害を予測し、減災対策をとるには、数値モデルのような予報可能時間の長い予測システムの開発が必要となる。そこで、本研究では気象モデル WRF (Weather and Research Forecasting model) を用いて、豪雨の事例を対象に数値実験を行うことで、その計算精度を検証するとともに、豪雨の発生条件を検証することを目的とする。また、近年では、アンサンブル・カルマンフィルタ (Ensemble Kalman Filter; EnKF) によるデータ同化が気象分野において行われている。その中でも、EnKF に関しては、WRF への適用例が多くはない。そこで、EnKF の一種である局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (Local Ensemble Transform Kalman Filter; LETKF) によるデータ同化を行い、その有効性につい

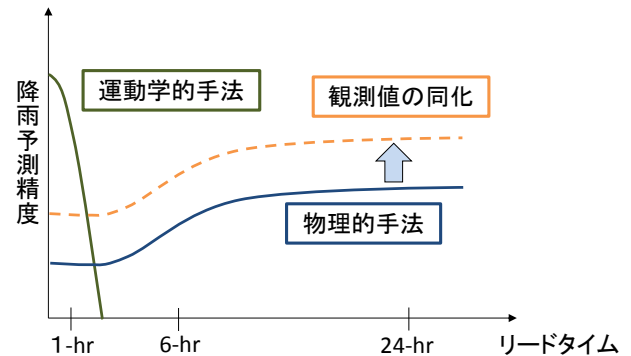


図-1 降雨予測手法の種類と精度

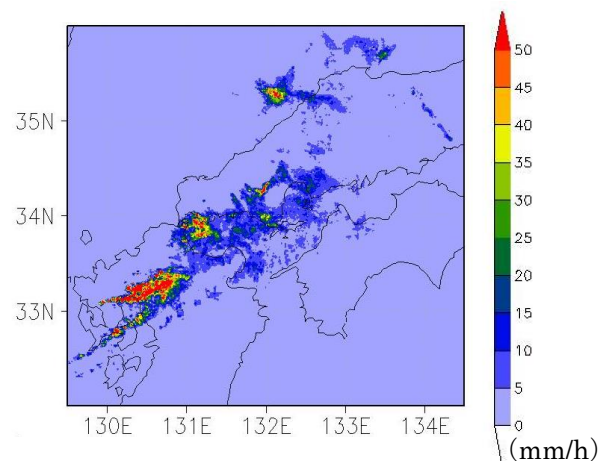


図-2 C-band レーダーによる降雨強度分布
(2012年7月14日6:00)

ても議論する。

2. 対象豪雨の概要

本研究では、2012年7月11日から7月14日にかけて、九州北部で発生した九州北部豪雨を対象とした。なお、この豪雨は前線性の降雨である。図-2に、2012年7月14日6時におけるC-bandレーダーによる降雨強度分布を示す。図より、福岡南部および熊本北部を中心に線状降水帯が発生していることが分かる。また、降水帯における強い降雨強度の範囲は長時間に渡り停滞していた。

表-1 に九州北部の観測点における期間降水量²⁾を示す。黒木では、期間中の最大一時間雨量は 14 日 10 時において 91.5mm/h となっており、1998 年に観測された 83mm/h を更新するものであった。さらに、表中に示す期間中の累積雨量は 600mm を超え、7 月の月降水量平均値である 378.5mm の約 1.7 倍となり、九州北部の観測点の中で最も平年より強い降雨が発生している。

3. 数値実験の概要

3.1 気象モデルの概要

本研究で使用した気象モデル WRF は米国国立大気研究センター (National Center for Atmospheric Research) が中心となり開発が進められている領域型の気象モデルである。ここで、領域型気象モデルとは特定の領域を計算領域とし、大気場の変化を予測するモデルのことを意味する。WRF の特徴の一つとして、静水圧近似を用いていないことから、格子幅を狭く設定することができ、その幅は約 1km 程度となる。そのため、メソスケール気象に対応したモデルとなっている。また、放射過程、降水過程、接地境界層における物理モデル (パラメタリゼーション) を自由に設定可能であることから、様々な現象に対処できるようになっている。

3.2 同化手法の概要

数値モデルによる予報において、その精度は数値モデルの完成度と予報を開始する際に与える初期値の精度に強く依存する。後者に対する解決策として、データ同化による初期値の精度向上が挙げられる。その予報誤差を観測値によって修正し、真の状態に近づいた状態にする。この状態を、大気の尤もらしい状態 (解析値) と呼び、観測値による予報値の修正をデータ同化と呼ぶ。さらに、データ同化によって得られた解析値を初期値とした予報を行い、観測値による予報値の修正により解析値を得る。このサイクルを繰り返すことで、さらに予報値を真の状態に近づける。このようなサイクルのことを解析予報サイクルと呼ぶ。

本研究で使用した LETKF は Miyoshi ら³⁾によって開発された手法で、アンサンブル・カルマンフィルタの一種である。アンサンブル・カルマンフィルタは、アンサンブル予報を行い、解析値を求める際に必要な誤差共分散行列をアンサンブルメンバーで近似して求め

表-1 アメダス観測点の期間降水量

順位	都道府県	市町村名	地点名(よみ)	降水量(mm)
1	熊本県	阿蘇市	阿蘇乙姫(アソトヒメ)	816.5
2	大分県	日田市	椿ヶ鼻(ツバキガハナ)	656.5
3	福岡県	八女市	黒木(クロギ)	649.0
4	福岡県	久留米市	耳納山(ミノウサン)	602.0
5	熊本県	阿蘇郡南阿蘇村	阿蘇山(アソサン)	570.5
6	熊本県	阿蘇郡南小国町	南小国(ミナオグニ)	493.5
7	熊本県	菊池市	菊池(キクチ)	485.5
8	福岡県	久留米市	久留米(クルメ)	469.0
9	大分県	日田市	日田(ヒタ)	462.0
10	熊本県	山鹿市	鹿北(カキ)	432.5

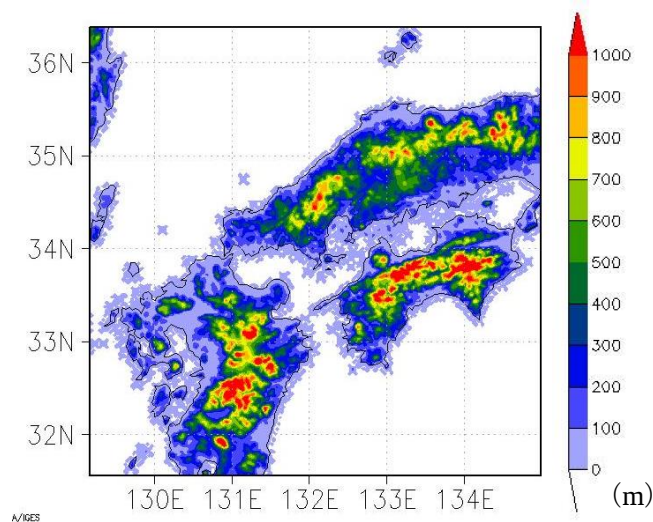


図-3 計算領域におけるモデル地形

表-2 計算条件

格子数(WE×SN×V)	180×180×40
格子間隔: dx(WE), dy(SN)	3km
タイムステップ	12sec
地表面スキーム	Monin-Obukhov similarity theory
地表面モデル	Noah land-surface model
境界層スキーム	MYNN Level 2.5 PBL
雲微物理モデル	Lin scheme (including ice phase)

る手法である。さらに、LETKF は各格子点の局所領域を独立として取り扱う局所化を行なっていることから、計算領域を計算機の各ノードに分割し、各々でデータを同化することを可能とした。そのため、並列計算に向いており、計算効率の向上が実現されている。

3.3 計算条件

図-3 に計算領域におけるモデル地形を示す。本研究では、計算領域を鹿児島から兵庫までを正方形で囲むように設定した。表-1 に計算条件を示す。格子間隔は 3km であり、過度の計算負荷をかけず、集中豪雨の発生を捉えることの出来るように設定した。また、タイムステップに関しては、CFL 条件に基づき、安全側をとるように 12 秒に設定した。

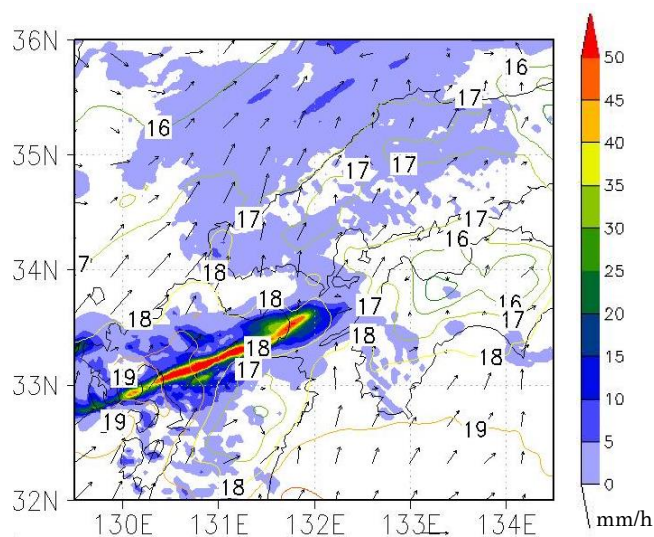
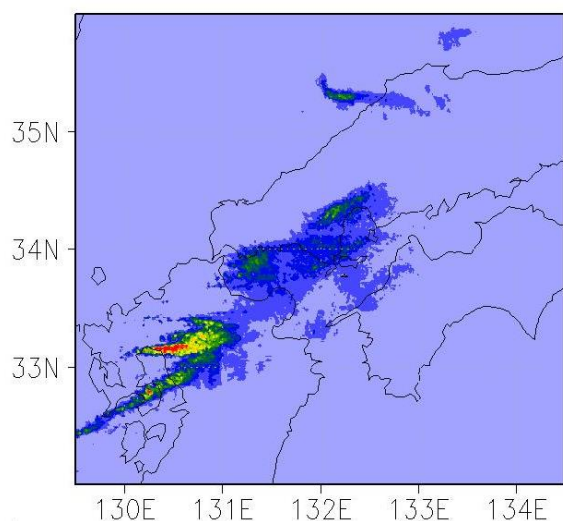


図-4 2012 年 7 月 14 日 7 : 00 の一時間降雨量 (左 ; C-band レーダー, 右 ; 計算値)

モデルに与える境界値には気象庁領域気象モデル MSM の結果を使用した．なお，MSM にはない 70hPa 面より上空のデータを GSM，土壌水分量を FNL 客観解析データ，海表面温度は RTG-SST を外挿して使用した．初期値に関しては，アンサンブル予報を行う場合，その各メンバーの初期値は適当なスプレッド（バラつき）を有していることと計算不安定が発生しないことが重要となる．本研究では，異なる日付の同じ時刻を初期値とし，共通の境界条件を用いた 2 日間のスピンアップ計算を行った予報値を初期値として使用した．スピンアップ計算とは，モデルに初期値が十分に整合していない場合に生じる初期のノイズを除去することを目的として行う．

また，同化データとして AMeDAS の風速（東西，南北の二成分），気温を用いている．同化した観測点は，中国地方（広島，岡山，山口，鳥取，島根），九州北部（福岡，佐賀，長崎，熊本，大分），そして四国北部（愛媛，香川）の計 170 点であった．さらに，NCEP より発行される PREPBUFR を使用した．PREPBUFR は，観測網が世界に渡る．データ内容は，地上および海上観測による風速，気温，比湿，気圧が収録されている．

積分時間は 2012 年 7 月 12 日 21 時から 7 月 15 日 0 時に設定した．

4. 計算結果

4.1 レーダー雨量計との比較検証

図-4 に，2012 年 7 月 14 日 7 時の一時間雨量分布を示す．左は気象庁が保有する C-band レーダー，右は

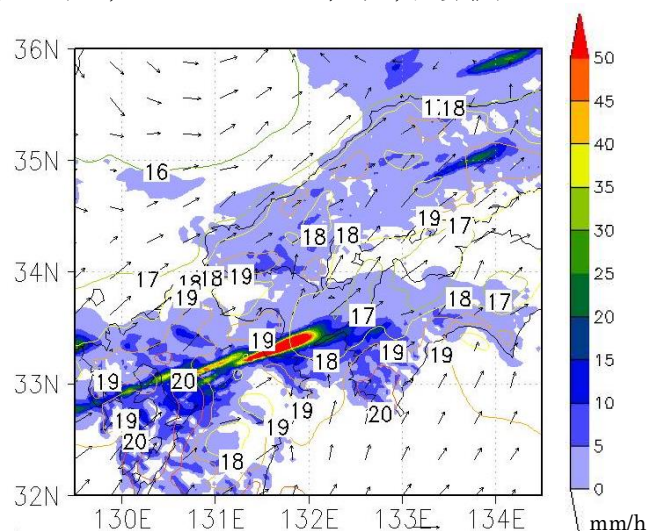


図-5 2012 年 7 月 14 日 9 : 00 の一時間計算降雨量

WRF による計算値を示す．レーダー雨量と計算雨量ともに，九州北部において強い降雨が発生していることが分かる．しかし，計算雨量はレーダー雨量と比較して，僅かに南にずれている．また，レーダーでは九州西端において降水系が二手に分かれているのに対し，計算雨量では直線状の降水帯になっている．この二手に分岐する傾向は 7 時以降でも見られ，時間経過につれて顕著となっている．しかし，降水系が時間経過に伴い，南下する傾向がレーダーと計算の両方でも見られた．また東西方向に関しても，時間経過に伴い，僅かに東へ移動する傾向が両方に見られた．以上のことから，降水帯の形状や位置に僅かな違いがあるが，移動パターンは一致しており，比較的良好な再現結果だと言える．

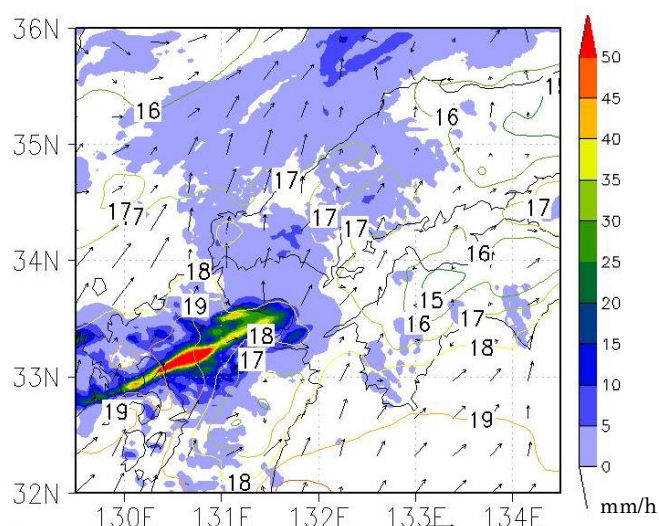
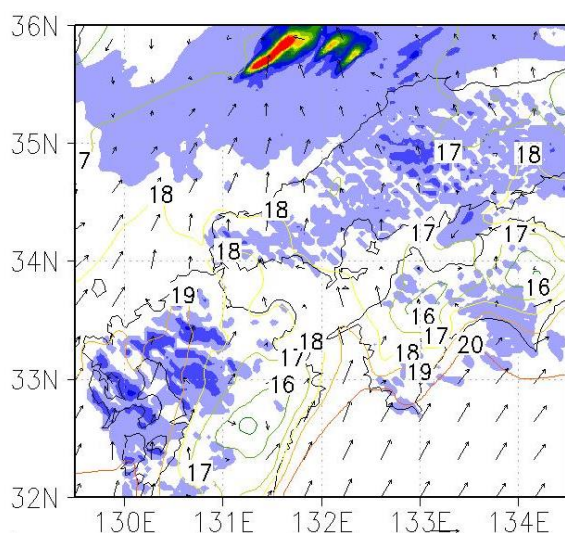


図-6 2012 年 7 月 14 日 6:00 の平面分布 (左 ; 同化なし, 右 ; 同化あり)

4.2 水平面における風速場と水蒸気の関係による発生条件の検証

図-4 中右の計算結果より, 7 時において九州西端の東シナ海側で, 高い水蒸気混合比を示している. さらに, その高い混合比の分布は九州の内陸の降雨が発生している箇所にまで伸びている. 図-5 に示す 9 時では, 高い混合比の分布はさらに南西へ進む様子が見られた. また, この進行方向と地上風の風向が一致することから, 水蒸気が九州内部へ輸送され, 降雨の発生に起因することを示唆している.

4.3 LETKF による同化効果の検証

図-6 に同化しない場合と同化した場合における風速, 水蒸気混合比, 降雨量の平面分布を示す. 同化しない場合の計算条件は同化したものと同一とし, アンサンブル予報を行わず, 一つの初期値のみの予報を行った. 図より, 同化しない場合では同化した場合で見られた九州北部での強い降雨が見られず, 僅かな降雨量となった. また, 強い降雨は日本海上に見られた. このようになる理由として, 同化した場合では, 九州の西側でほとんどのベクトルが南西を向いている. それに対し, 同化しない場合では, 一部のベクトルが南に向いている様子が見られた. また, 風速も僅かに同化しない場合の方が小さくなっている. そのため, 九州の内陸に水蒸気が十分に輸送されず, 高い水蒸気混合比の分布も僅かに九州の外側にずれている.

以上のことから, データ同化を行い, 観測値による風速および風向の修正を行うことで, 実現象に近い状

態となることから, 本研究で使用した LETKF は WRF への適用に効果があることが分かった.

5. 結論

WRF と局所アンサンブル変換カルマンフィルタによるデータ同化を組み合わせ豪雨解析を行い, 次のような知見を得た.

- 1) 降雨量の精度に関して, 計算雨量とレーダー雨量ともに九州北部において強い降雨が見られ, 比較的良好な再現結果を得ることができた.
- 2) 地上風速と水蒸気混合比の関係から, 南西風が東シナ海の水蒸気を九州北部の内陸へ輸送している様子を再現し, 豪雨の発生に起因することを示した.
- 3) 同化無しの場合には, 同化有りの場合と比較して, 風向および風速に違いが見られ, 強い降雨が現れなかったことから, LETKF の WRF への適用効果が実証された.

参考文献

- 1) 中北英一: 集中豪雨のモニタリングと予測, ながれ, 第 29 巻, pp.203-210, 2010.
- 2) 気象庁: 平成 24 年 7 月九州北部豪雨, 12p., http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/new/jyun_sokuji20120711-0714.pdf.
- 3) Miyoshi, T., and Kunii, M.: The local ensemble transform Kalman Filter with the weather research and forecasting model: experiments with real observation, *Pure Appl. Geophys.* DOI 10.1007/s00024-011-0373-4, 2011.