LETKFを適用したWRFによる 平成24年九州北部豪雨の解析 ANALYSIS OF HEAVY RAINFALL IN NORTHEN KYUSHU ISLAND USING WRF-LETKF

北 真人¹・牛山朋來²・河原能久³・椿 涼太⁴ Masato KITA, Tomoki USHIYAMA, Yoshihisa KAWAHARA and Ryota TSUBAKI

 ¹正会員 修(工) 中電技術コンサルタント株式会社(〒734-8510 広島市南区出汐二丁目3-30)
²正会員 博(地球環境科学) 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター (〒305-8516 つくば市南原1-6)
³フェロー会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究科社会基盤環境工学専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)
⁴正会員 博(工) 広島大学大学院助教 工学研究科社会基盤環境工学専攻(同上)

This study is concerned with the numerical prediction of the heavy rainfall occurred in 2012 in the northern part of Kyushu Island, which caused big floods in many rivers there. This study has two objectives. One is to validate the performance of WRF (Weather and Research Forecasting) model coupled with a data assimilation method named LETKF (Local Ensemble Transform Kalman Filter). The other is to discuss the evolution of rainfall system based on the numerical results. It is found that the numerical model with LETKF can reasonably capture the heavy rainfall occurred at 7:00 in northern Kyushu. Numerical results also demonstrates that the high mixing ratio near Kagoshima was transported in the north direction by the strong southwest wind, which caused the evolution of a series of cumulonimbus and the heavy rainfall.

Key Words : Heavy rainfall, Weather Research and Forecasting model, data assimilation, Local Ensemble Transform Kalman Filter

1. 序論

近年,地球温暖化による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が増加する傾向 にある.限られた地域において短時間に多量の降雨が発 生した場合,流域では外水・内水氾濫,土砂災害が発生 することが懸念される.そのため,豪雨災害の軽減対策 を講じることがますます重要となっている.そのソフト 対策の一つとして,早期雨量予測のような気象・災害情 報の高度化とその雨量の活用が挙げられる.

降雨の予測手法は運動学的手法と物理的手法の二つに 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.物理的手法は、大気の運動 方程式などで構成される数値モデルを積分し、物理量の 変化を予測する手法である.また、この二つの手法は予 報時間によりその予測精度が変化することが知られてい る¹⁾.運動学的手法では,一時間程度までの予測が有効 とされ,物理的手法に関しては,二時間程度先からの予 測に有効であるとされている.そのため,早期に豪雨を 予測し,減災対策をとるには物理的手法が有効であると 考えられる.

物理学的手法による予報情報の活用例として,三石ら ²⁾は、本研究でも使用する気象モデルWRF(Weather and Research Forecasting model)による予測雨量を用いて流 出解析を行い、それによって得られるダム流入量により、 洪水時におけるダム操作のシミュレーションを行った. そして、ただし書き操作の場合よりも最大放流量を低減 し、氾濫被害を低減する可能性を示唆した.

このように、物理学的手法が水災害の軽減に大きく貢献し、治水面における河川管理に対して有用であること は知られているが、モデルの完成度およびモデルに与え る初期値が予測結果に大きな影響を与えることが課題と なっている.後者の解決策として、データ同化による初 期値の精度向上が挙げられる.そこで、本研究では、物 理的手法のさらなる予測性能の向上を目指して、局所ア ンサンブル変換カルマンフィルタLETKF: Local Ensemble Transform Kalman Filter)をWRFへ適用し、豪 雨解析を通して、その精度および有効性を明らかにする ことを目的とする. さらに、レーダー観測では得られな い物理量を数値予報では空間的に密に得られることに着 目して、豪雨の発生機構を検討した.

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、対 象期間中に前線が九州付近に最接近していることから、 対象豪雨は前線性の豪雨である. 図-1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. なお、7月12日にも熊 本を中心に線状降水帯が見られており、対象期間中に発 生した複数回の線状降水帯が大きな被害をもたらした.

図-2に、アメダスの黒木観測点における2012年7月14 日の一時間雨量と累積雨量を示す.対象観測点において、 一時間雨量の最大値は87mm/hとなっており、1998年に 同地点で観測された83mm/hを更新するものであった. さらに、期間累積雨量(7月11日~7月14日)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 が発生した.

人的被害としては死者・負傷者が58名となっている³. また、構造物被害に関しては、熊本を中心に多数の家屋 の全壊および半壊が起こり、福岡では4000棟を超える床 下浸水の被害があった³⁾.後者の床下浸水に関しては、 柳川市に位置する矢部川水系矢部川での堤防の決壊によ る市内への水の流入が原因であると考えられる.このよ うに、対象とした豪雨は、当該地域に対して最も甚大な 被害をもたらした豪雨である.

3. 数値解析の概要

(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 中心となり開発を進め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、雲物理過程、放射過程、



降水過程,接地境界層における物理モデルを自由に設定 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.

(2) 同化手法の概要

上述のように、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⁵⁾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



表-1 計算条件

格子数(WE×SN×V)	$180 \times 180 \times 40$
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)

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) 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.モデル地形を作成する際の地形データは、米国地質調査所(USGS)が発行する30秒間隔の地形データおよび土地利用データを利用した.地形データは、設定した格子幅を基に平滑化され、モデル地形が作成される.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が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.

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のデータにはない 70hPa面より上空のデータにはGSMのデータ,土壌水分 量にはFNL客観解析データ,海表面温度にはRTG-SST データを使用した.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)を有していることに加え計算不安定 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



図-4 LETKFの解析予報サイクル

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ものである.

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.

図-4にLETKFによる解析予報サイクルを示す.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.図中の水色の矢印は、WRFによるアンサンブル予報を示す.なお、本研究では、アンサンブルメンバー数を13として予報を行った.9時間の予報を1サイクルとし、図中の青色の矢印はデータ同化を示し、その後半7時間に対して、1時間毎に処理をする.各時刻において13個の予報値から13個の解析値が得られる.そして、図中のオレンジ色の矢印で示すように、得られた解析値は次の予報サイクルの初期値として受け渡され、13メンバーのアンサンブル予報を行う.以下、設定した積分時間になるまで、同じ操作を繰り返す.

4. 計算結果

(1) レーダー雨量計との比較検証

図-5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WRFによる 計算値を示す.なお、レーダー雨量に関しては、降雨強 度を一時間雨量に換算して示している.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,図-6に示す同日9時の一時間雨量分にお いても見られ,時間経過に伴い顕著となっている.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、九州北部において強い降雨が発生す るという点と、降水系の南北および東西方向への移動パ ターンが一致しているという点において一致しているこ とから、比較的良好な再現結果であると言える.しかし、 発生位置や時間経過に伴う降水系の形状の変化などに関 しては、両者で僅かに違いがあり、流域部での降雨が再 現されていないため、適切な物理モデルの選択、同化 データの充実などの課題が残されている.

a) 水平面における風速場と水蒸気の関係による発生要 因の検証

図-5および図-6の右の計算値におけるコンターライン は、下層における水蒸気混合比を示している.ここでは、 水平面における混合比分布の変化より、降雨の要因とな る水蒸気輸送を検討する.図-5より、7時において九州 西端の東シナ海側で、19g/kgの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-6に示す 9時では、図-5で見られた高い混合比の分布はさらに九 州の北東部へ進む様子が見られた.また、図-5、図-6中 の風速ベクトルより、九州西端では南西風が吹いている ことが分かる.この高い水蒸気混合比の範囲が伸びる方 向と、その付近で吹く風向が一致していることから、東 シナ海上で発生した水蒸気が、南西風により九州の内陸 へ輸送され、降雨の発生に起因していることを示唆して いる.

(2) 計算に基づく降雨発生機構の検討



図-10 a-b断面における降水混合比分布(2012年7月14日14:00)

図-9に、同じ断面で切った水蒸気混合比の鉛直分布を示す.図より、表層では混合比が高く、前線の境界部である北緯33.5度では,0.018kg/kgを示している.また、北緯33度付近では表層上部でも比較的高い混合比が見られた.そのことから、その付近で強い対流が発生していることから上層への水蒸気供給が行われたことが考えられる.さらに、図-10の雨と雪の混合比を足し合わせた降水混合比^のの鉛直分布より、強い対流の発生地点で混合比は高くなっていることから、対流による降雨が発生したことが分かる.

以上のことから,計算値より,降雨の発生プロセスと して,東シナ海からの水蒸気供給と前線による対流が豪 雨の発生要因であることが分かった.

(3) 同化効果の検証

図-11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





図-9 a-b断面における水蒸気混合比分布(2012年7月14日7:00)

b) 鉛直断面による発生要因の検討

図-5の右に示すように、東経131.3度を基準に、南北 方向に切ったa-b断面における鉛直風の鉛直分布を図-7 に示す.なお、図中の縦軸は計算条件設定時に決めた鉛 直方向の格子数となる.図-7より、表層部において、断 面全域に渡り鉛直風の値が正(上昇流)と負(下降流) を表しており、対流が発生していることが分かる.さら に、北緯32度から北緯33.5度の表層から中間層にかけて 強い上昇流と下降流が見られ、この付近では対流活動が 活発化していることが分かる.

さらに、図-8に同じ断面で切った温位の分布を示す. 図より、表層において、北緯33.5度を境界に温位の違い が見られた. 南側では温位は高く、北側では低くなって いる. このことから、この付近に梅雨前線が接近してき ていることが考えられる. そして、図-7の対流発生地点 と一致していることから、前線による対流であることが 考えられる.



図-11 2012年7月14日6:00の平面分布(左;同化なし,右;同化あり)

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、強い降雨が発生しなかったことが考えられる.

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の予測 精度を向上させることが分かった.

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て豪雨解析を行い,次のような知見を得た.

- 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、移動パ ターンも一致するなど、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 が見られた。
- 3) 温位の鉛直分布より前線の位置を把握し、その温位の位置と対流の位置より上層への水蒸気の輸送が見られたことから、豪雨の発生要因を明らかにした.

4)同化無しの場合に、同化有りの場合と比較して、風向と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.以上のように、WRFにLETKFを適用することで、予測精度が向上することが実証された.しかし、再現性に関して、流域部での降雨が再現されていないなどの課題が残されている.そのため、予測雨量情報の早期外部発信に対しては有用であるが、洪水予測等への適用には、十分な精度を確保出来ていないのが現状である.今後は、同化データの充実化、物理モデルの変更による感度実験を行うことで、より高精度な災害予測システムに適用し得る予測精度の向上を図る予定である.

謝辞:気象庁のMSM-GPVデータ及びC-bandレーダー データは京都大学生存圏研究所生存圏データベースから ダウンロードした.ここに記して謝意を表す.

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.
- 三石真也,角哲也,尾関敏久:WRFによる降雨予測を活用 したダム操作に関する検討,ダム工学,20, pp.94-104, 2010.
- 消防庁:7月11日からの梅雨前線による大雨について(第20 報), http://www.fdma.go.jp/bn/data/7月11日からの梅雨前 線による大雨について(第20報).pdf
- Miyoshi, T., and Kunii, M.: The local ensemble transform Kalman Filter with the weather research and forecasting model: experiments with real observation, *Pure Apple. Geophys.* DOI 10.1007/s00024-011-0373-4, 2011.
- 5) 辰己賢一, 竹見哲也, 石川裕彦: WRFモデルを用いた高解 像度シミュレーションシステムの構築:豪雨の事例解析, 京都大学防災研究所年報, 第51号B, pp.437-448, 2008.

(2013.4.4受付)