

## 1.2 短時間急激増水に対応できる洪水予測に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：水災害研究グループ

研究担当者：岩見洋一、佐山敬洋、牛山朋来

### 【要旨】

短時間急激増水に対する洪水予測を実現するため、領域気象モデルを物理的にダウンスケールし、降雨流出から洪水氾濫までを一体的に予測する研究を進めている。本年度は、領域気象モデル(WRF モデル)に局所アンサンブル変換カルマンフィルターと呼ばれるデータ同化手法を導入し、地上海上航空機観測や GPS 可降水量などの気象情報を数値予測に同化した実験結果を示す。予測実験の対象洪水は、2012 年の熊本県白川流域における洪水とし、予測のリードタイムは最長 33 時間に設定した。アンサンブルの降雨予測結果を、降雨流出氾濫(RRI)モデルに入力し河川流量・洪水氾濫の予測計算を行った結果、アンサンブル平均では今回の洪水を過小評価する一方、降水分布の位置を補正することによって、洪水の可能性を予測することが可能になることが分かった。

キーワード：洪水予測、物理的ダウンスケーリング、WRF、RRI、アンサンブルカルマンフィルター

### 1. はじめに

近年、局地的豪雨の発生に伴う洪水被害が国内外で頻発している。2010 年に発生したパキスタン洪水のように、気象水文情報の乏しい地域において、短時間急激増水が発生すると多数の死者を伴う甚大な被害が発生する。発展途上国における短時間急激増水に対応する住民避難や河川施設の運用を通じた洪水被害の軽減を実現するために、限られた時間で降雨の時空間分布を予測・把握し、その情報をもとに河川の流出や氾濫形態までを一体的に予測することが求められている。

本研究は、そのような背景のもと短時間急激増水の洪水予測精度向上を目指して、全球数値気象予報モデルの物理的ダウンスケーリングによる降水量予測と、流出氾濫の一体解析手法について研究を進めている<sup>1)</sup>。

上記の目標を達成するため、これまでパキスタン・カブール川の 2010 年洪水、インドネシア・ソロ川の 2007 年洪水を対象として、領域気象モデルのダウンスケーリングを実施し、その再現性を確認してきた。カブール川においては、タイムラグアンサンブル予報によって流出氾濫を予測することで、不確実性情報を含めた洪水予測が可能なること、ダウンスケーリング前の全球モデルの予測結果に比べて、河川流量・洪水氾濫の精度が向上することを示した<sup>2)</sup>。さらに、2011 年に発生したタイ洪水に対して緊急対応として RRI モデルを用いた洪水予測を実施し、そ

の後の現地調査の結果と比較しながら予測精度の検証を進めてきた<sup>3)</sup>。

また一昨年度より、降水量の予測精度向上と予測の不確実性評価を目指してアンサンブルカルマンフィルターを領域気象モデルに導入する研究を進めてきた。本年度は、降水量の予測精度を向上させるため、局所アンサンブル変換カルマンフィルター(Local Ensemble Transform Kalman Filter; LETKF)<sup>4),5)</sup>の枠組みで GPS 可降水量のデータも同化した結果を示す。また本年度は、2012 年に熊本県白川流域で大きな被害をもたらした集中豪雨(平成 24 年 7 月九州北部豪雨)を解析対象とし、本プロジェクトで開発を進めてきた RRI モデルに入力することによって、河川流量と洪水氾濫の一体的な予測の可能性を検討した。

## 2. アンサンブルカルマンフィルターを用いた降雨流出予測実験

### 2.1 方法

本研究は、一般的なワークステーションを用いて、比較的狭い領域を対象に領域アンサンブル予報を行った。アンサンブル予報の手法として、アンサンブルカルマンフィルターの一つである LETKF を用いた。アンサンブルカルマンフィルターは、データ同化とアンサンブル予報を結合させた手法である。LETKF は特に並列計算に適したアルゴリズムである。同化する観測データ密度に応じた安定化係数(誤差共分散膨張係数)

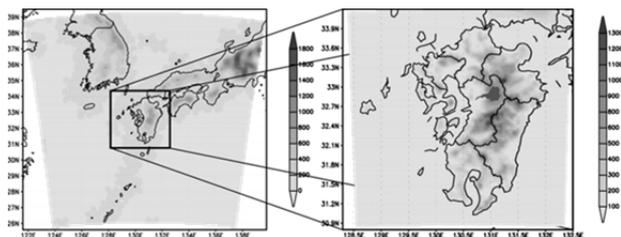


図-1. モデル計算領域。影は標高 (m) を表わす。  
熊本県北東部の黒い影が白川流域を示す。

表-1. WRF モデル設定

格子数	外側 101x101x40, 内側 126x126x40
水平格子間隔	外側 15km, 内側 3km
計算時間外側	2012年7月1日12時~7月12日3時
計算時間内側	2012年7月10日0時~7月12日3時
初期、境界条件	気象庁 MSM、NCEP GFS4
雲物理過程	外側 WRF Single Moment 3class 内側 Lin スキーム (氷相を含む)
積雲パラメタリゼーション	Kain&Fritsch スキーム 気象庁方式によるチューニング
土地利用分布	USGS 30 秒間隔

を自動的に与えるなど最新の機能を持つ<sup>5)</sup>。

本研究では、2012年に熊本県白川流域で大きな被害をもたらした集中豪雨（平成24年7月九州北部豪雨）を解析対象とした。LETKFを用いた領域アンサンブル予報結果を地上観測やレーダー観測と比較し、さらに予報流量を観測値と比較することにより、予報の精度や有効性について議論を行う。

用いた領域気象予報モデルは、米国で開発され、これまでに多くの実績を持つWRF (Weather Research and Forecasting) ver.3.4.1である。計算領域は、熊本県を中心に九州全域を含む、図-1右のような領域を内側の高解像度領域として設定し、それを取り囲む外側領域を図-1左のように設定した。モデルの設定を表-1に示す。

LETKFにおいて同化したデータは、米国NCEP (National Centers for Environmental Prediction)に保管されている、PREPBUFRと呼ばれる全球数値天気予報システムで使われる地海上航空機観測(風、気温、気圧)、ラジオゾンデ(風、気温、比湿)、および衛星追尾風、これらに加え、気象台およびアメダスの(風、気温、湿度)の1時間毎の瞬間値、およびGPS可降水量である。GPS可降水量以外のデータは、インターネットから取得できる。GPS可降水量は、アンサンブルカ

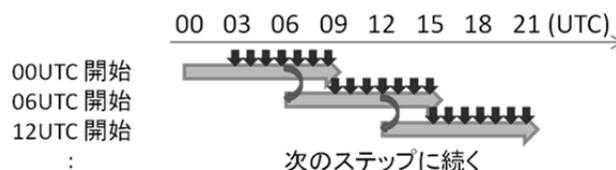


図-2. LETKF の計算進行の概念図。  
Miyoshi and Kunii (2011)<sup>5)</sup>より入手

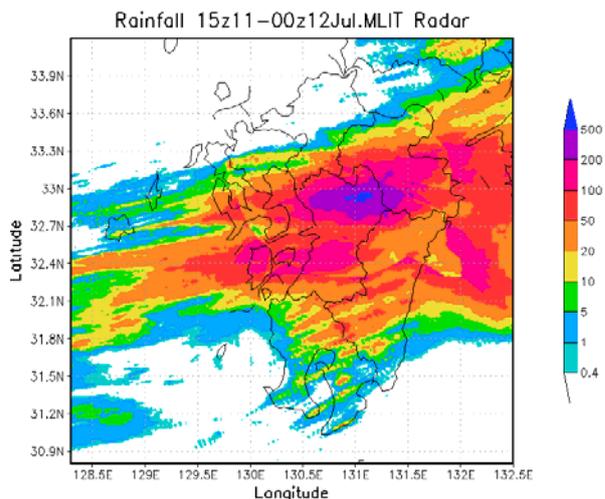


図-3. 7月12日00時~09時(日本時間)の国交省Cバンドレーダー雨量計による積算雨量(mm)

ルマンフィルタの場合そのままでは同化できないため、Seko et al.(2013)の方法<sup>6)</sup>を用いて相対湿度に変換してから同化した。

モデルの側面境界条件は、気象庁領域予報MSM(計算格子間隔5km)を主に用い、50hPa面の情報や土壌水分量や地中温度をNCEP GFS4 (Global Forecast System version4)で補った。アンサンブルメンバー数は51とした。それぞれのアンサンブルメンバーの初期値は、気象庁週間アンサンブル予報の各メンバーを24時間積分して作成した。

LETKFによる計算の進め方を図-2に示す。右向きの太い矢印が21メンバーのWRFによるアンサンブル予報を表わす。1回の予報サイクルは6時間毎である。WRFによる9時間予報が完了した後、縦の小さな矢印で示された1時間毎の観測データを後半6時間の予報値に同化するLETKF計算を行い、この6時間の中央時刻における解析値(51メンバー)を得る。得られた解析値は次のアンサンブル予報サイクルの初期値として用いられ(下向きの曲線矢印)、再び51メンバーの9時間予報を行う。以下、6時間毎に同じ操作を繰り返す。なお、図-2には1種類のLETKF計算のみを示している

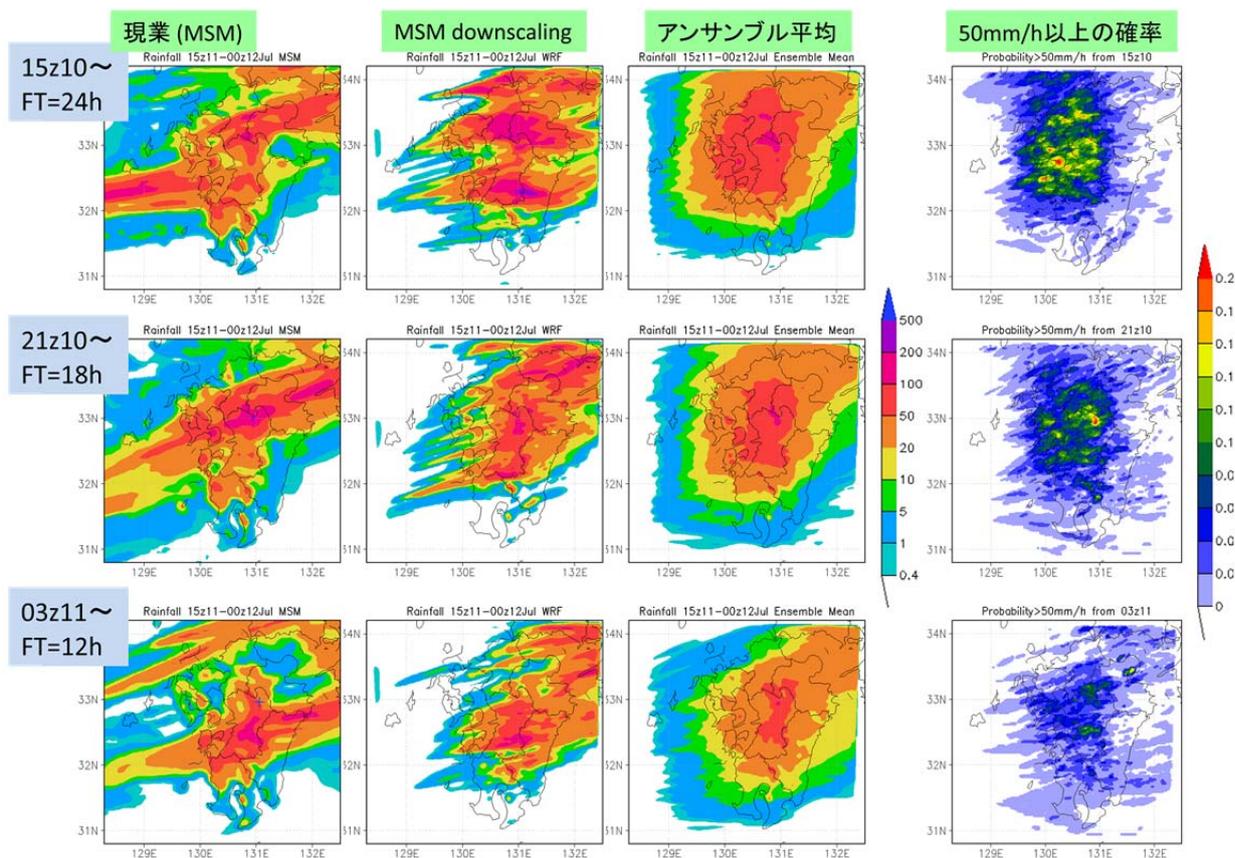


図-4. 33時間予報による7月12日00時～09時（日本時間）の降水積算値。左から、MSM 現業予報、MSM のダウンスケーリング、アンサンブル予報、アンサンブル予報による 50mm/h 以上の雨が降る確率。横の列は、上から 24 時間予報、18 時間予報、12 時間予報である。

が、今回の実験では2重ネスティングによる2種類の解像度による計算を行っている。これらは、外側フレームの情報を内側フレームに渡すだけのOne way nestingである。そこでまず外側フレームの計算をすべて終えてから、外側モデルの情報を境界条件として内側モデルに与えて計算を行っている。

LETKFによって得られた各メンバーの解析値は、データ同化が行われると同時に、様々な成長可能性を持つアンサンブル摂動を持つ。従って、これらを初期値に採用してアンサンブル予報を行うことで、様々な時間発展による不確実性を考慮した予報値を得ることが期待できる。今回は、豪雨発生のそれぞれ24時間前、18時間前、12時間前の時点における33時間予報を行い、アンサンブル予報の精度について評価した。なお、33時間までであるのは、境界条件として用いたMSMが33時間までの予報値を提供しているためである。MSMは当時1日8回予報されていて、そのうち3時9時15時21時UTCからの4回が33時間先までの予報を行っている。

さらに、領域アンサンブル予報では、側面境界に摂動を与えることでデータ同化の効果を向上させるこ

とができる<sup>7)</sup>。また、今回のような比較的狭いモデル領域では、側面境界摂動の効果が大きく、また側面境界摂動を与えないとスプレッドが限りなく小さくなってしまいうため、側面境界摂動を与えてスプレッドを維持させる必要がある。今回は、各メンバーの初期値の摂動を側面境界に与えた。

なお、アンサンブル予報の効果を検証するため、確率分布を考慮しない決定論的予報も行った。これは、同じモデル設定で、アンサンブル予報に使用したものと同様のMSMの境界条件を与えた。

最後に、これらの予報実験で得られた降水量分布を用いて流出計算を行った。対象流域は、熊本県で最大時間降水量を観測した白川流域（流域面積480km<sup>2</sup>、図-1）である。用いたモデルは、土木研究所で開発されたRRIモデルである<sup>1), 3)</sup>。これを、国交省Cバンドレーダー雨量を用いて観測流量と合うようにキャリブレーションを行ったうえで、計算に使用した。流出計算には、洪水予報の現状をふまえ、WRFの33時間予報による予測降水量と、その時点以前のレーダーデータを用いた。つまり、その時点における最も信頼できる降水

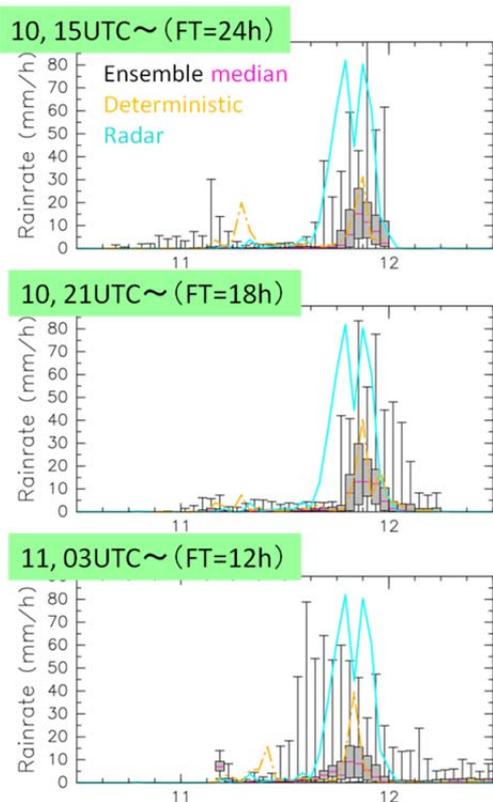


図-5. 白川流域平均降水量の時間変化。灰色のバーは、アンサンブルの25%~75%のquantile、縦棒はアンサンブルの0%~100%、ピンク色はアンサンブルメディアン、水色はレーダー観測値、黄色は決定論的予報である。図は上から24時間予報、18時間予報、12時間予報である。

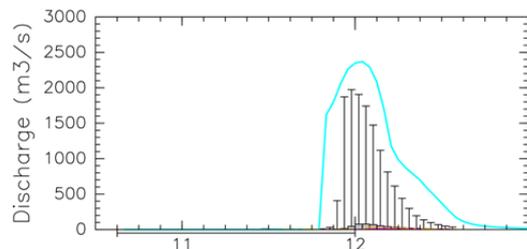


図-6. 白川流域末端におけるハイドログラフ。色の対応は図-5と同様である。

量情報を用いて流出予測を行った。なお、降水量の予報期間以降は、ゼロの降水量を流出計算に使用した。

## 2.2 平成24年7月九州北部豪雨の特徴

2012年7月11日から14日にかけて、福岡県、熊本県、大分県、佐賀県で大雨となった。11日朝に朝鮮半島付近に停滞していた梅雨前線が、12日朝には対馬海峡まで南下した。梅雨前線の南側に当たる九州北部地方では、東シナ海上から暖かく湿った空気が流入し、大気の状態が非常に不安定になった。発達した雨雲が線状に連なり次々と流れ込んだ熊本県

熊本地方、阿蘇地方、大分県西部では、12日未明から朝にかけて猛烈な雨が継続した。阿蘇市阿蘇乙姫では、同日01時から07時までに459.7mmを観測するなど、記録的大雨となった。図-3に12日00時から09時（日本時間）における国交省Cバンドレーダー雨量計による積算雨量を示す。熊本県東部の狭い地域に豪雨が集中している様子が把握できる。

また、13日には佐賀県、福岡県を中心に、14日には福岡県大分県を中心に大雨となった。この4日間の総降水量は、福岡県筑後地方、熊本県阿蘇地方、大分県西部で500mmを超えた観測所が計5地点あり、筑後地方では7月の月平年値の150%以上となった観測所が2地点あった。

この大雨により、河川の氾濫や土石流が発生し、福岡県、熊本県、大分県では死者30名、行方不明者2名となった他、佐賀県を含めた4県で住家被害13,263棟となり、その他道路損壊、農業被害、停電被害、交通障害等も発生した。

7月11日から14日にかけて九州北部地方に甚大な被害をもたらしたこの大雨について、気象庁は「平成24年7月九州北部豪雨」と命名した。

このように、九州北部豪雨は社会的にも大きな影響を与えた現象であったことから、降水量の予測検証を行う対象として適当なものだと言える。

## 2.3 結果

### 2.3.1 降水予報

図-4に、3kmメッシュの内側フレームの降水予報積算値の分布を示す。レーダー観測値（図-3）は、最大降水量が500mmを超えていたのに対し、予報値はいずれもそれを下回り、過小評価となっている。まず、MSM 現業予報では、予報時刻によって降水の位置が変わっており、正確な位置を予報するのが困難であったことがわかる。この中では18時間予報が最も現実に近い降水位置を予報しているが、値は200mm程度となっている。また、MSMをダウンスケーリングした結果でも、予報位置が異なる傾向は同様である。一方、アンサンブル平均では、降水量は最大でも100mm程度と小さいものの、降水の最大の位置は、いずれも熊本県の北東部となっていて、現実と良く一致している。また、一番右列の50mm/h以上の降水が現れる確率については、24時間予報はばらつきが大きいものの、18時間予報と12時間予報は比較的現実に近い位置に高い確率を予報していた。

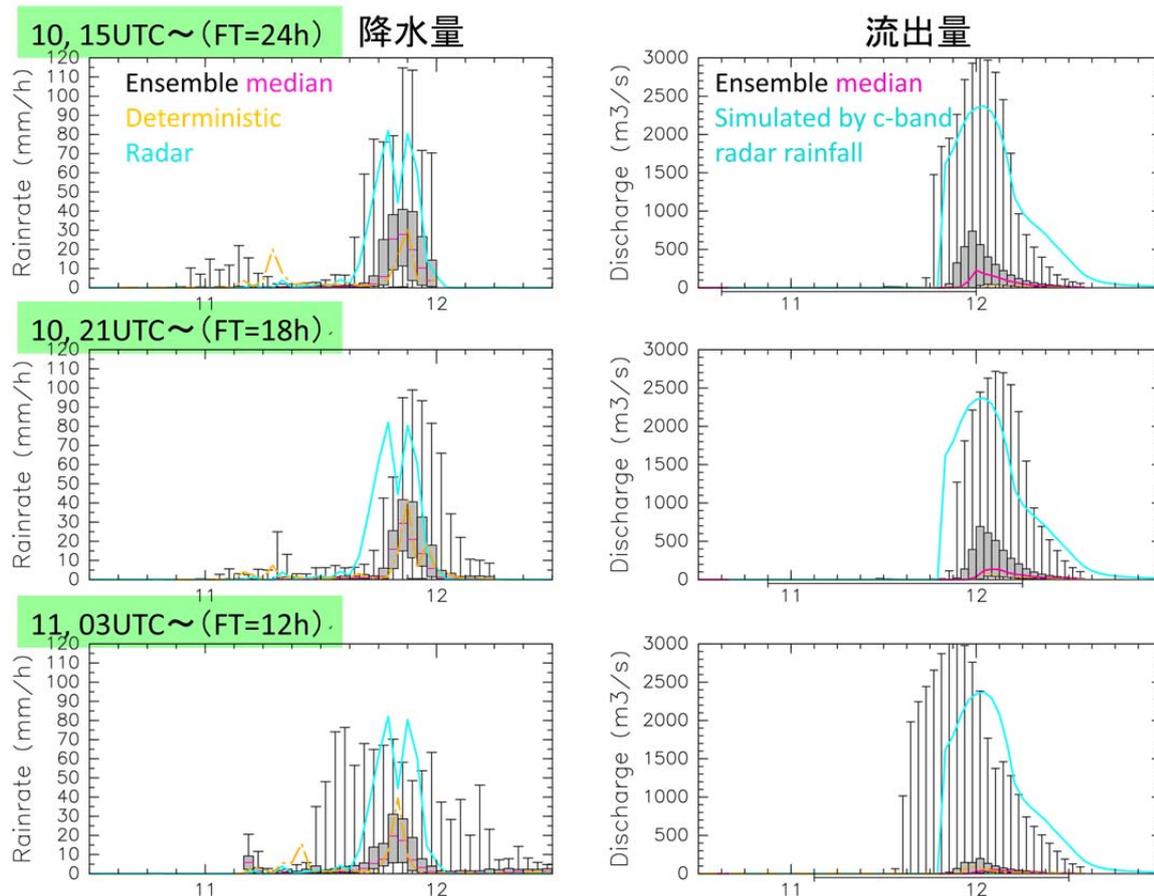


図-7. 降水位置の補正後の白川流域平均降水量（左）とハイドログラフ（右）。凡例は図-5、6と同様である。

次に、白川流域平均降水量の時間変化を図-5に示す。灰色バーで示したアンサンブル予報の主要なメンバーは、水色で示したレーダー観測雨量を大幅に下回っており、全体として過小評価になっている。これは、黄色線で示した決定論的予報も同様である。しかし、黒縦棒で示したアンサンブル予報の最大値は、辛うじて観測値に達している部分が多く見受けられる。言い換えると、予報値のばらつきを表現したアンサンブル予報の中で、最大のものは辛うじて観測雨量に達するものが表現できていたと言える。

### 2.3.2 流出予測

ここまでの実験により得られた白川流域の降水量

分布を RRI モデルに導入し、洪水予測を行った。図-6に、観測および予報雨量を用いて計算した、白川末端における流出量を示す。図-6では、ほとんどのアンサンブルメンバーが観測に比べて大幅に過小評価となっており、縦棒で示されたアンサンブルメンバーの最大値も観測から求めた流出量に届かなかった。言い換えれば、このアンサンブル洪水予測システムでは観測された洪水の可能性を予測することができなかった。

今回の洪水を予測することは、今回のアンサンブル予報システムをもってしても困難であった。その原因の一つは、集中豪雨の空間的広がりが小さかったために、アンサンブル予報を行っても降水分布の位置を精度良く予報できなかったと考えられる。

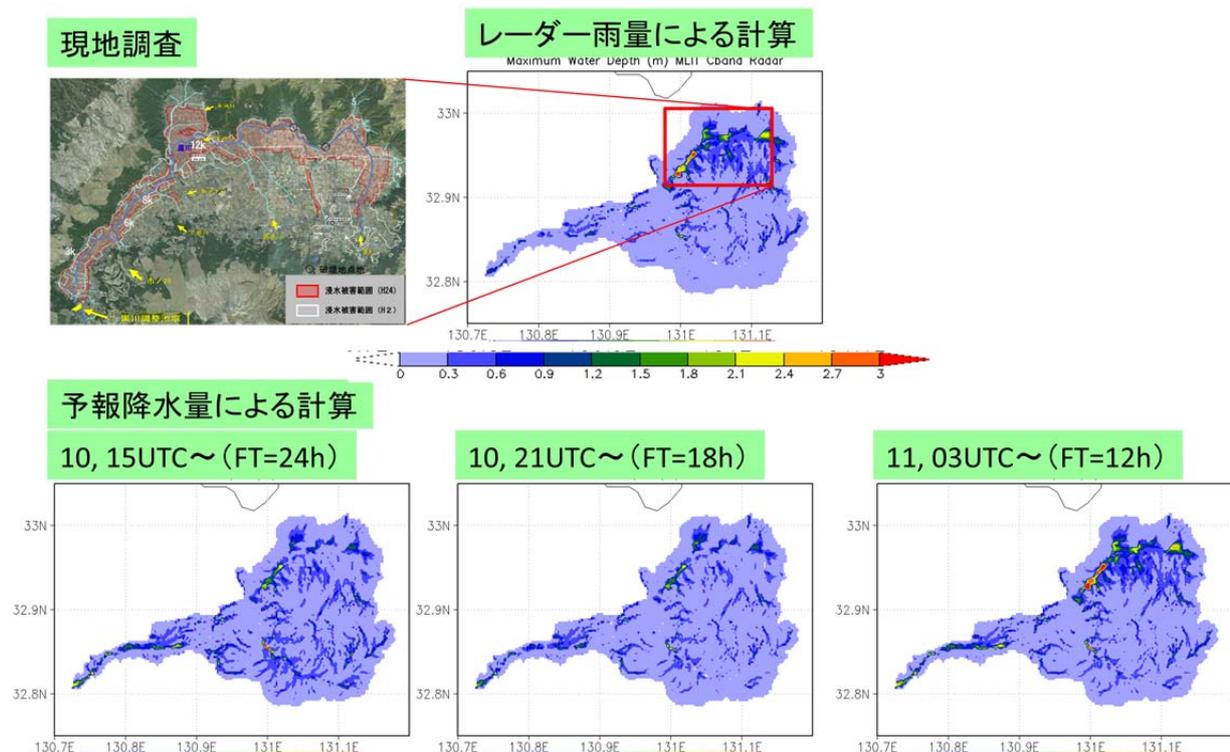


図-8. 洪水による最大浸水深の分布。左上：現地調査による浸水分布、赤影が平成24年の浸水被害範囲である（土木学会九州北部豪雨災害調査団報告書より<sup>8)</sup>）。上中：レーダー観測雨量から計算した浸水深分布。最も薄い青色は流域の範囲を示し、濃い青から赤までが浸水域である。下の3つは位置ずれ補正後の予報降水量を用いた浸水分布で、左から24時間予報、18時間予報、12時間予報である。

この欠点を克服するため、降水分布の位置の補正を試みた。洪水の原因となる12日00時から09時（日本時間）の各アンサンブルメンバーの積算降水量分布の位置を、最大45kmの範囲で東西または南北方向に水平移動し、白川流域降水量を最大化させる位置を探した。得られた可能最大予報降水量をRRIモデルに与えて流出量を算出した。結果を図-7に示す。補正後の降水量は、3種類の初期値の予報すべてについて大きくなり、各時刻のアンサンブルメンバー内の最大降水量は観測を上回る例が多くなった。しかし、灰色バーで示した主なアンサンブルメンバーが過小評価傾向であることは補正前と同様である。

図-7右のハイドログラフでは、灰色バーの主なアンサンブルメンバーが大幅に過小評価している点は補正前と同様であるが、アンサンブルメンバーの最大は、観測雨量を用いた流出量を超えた。このように、降水分布の位置を補正することにより、洪水の可能性を予測することが可能になった。

図-8に、RRIモデルで計算した浸水域分布を、現地調査の図とともに示す。現地調査は、流域の北東

部の黒川流域の浸水被害が大きかった地域のものである。白川支流の黒川に沿った地域では氾濫域が広がっているのが現地調査結果によって確認できる。この氾濫域は、図-8上中図のレーダー観測雨量を用いたRRI計算によりほぼ完全に再現されていた。また、浸水深は最大3mに達することが示唆される。

図-8下図の予報雨量を用いた浸水深分布は、浸水深の差はあるものの、氾濫域の多くを再現していた。この図は、アンサンブル洪水予測による浸水深の最大値を表したものであるため、観測された氾濫分布を越えるのは難しくないと言えるが、今回の一連の計算により洪水氾濫の可能性を示すことを確認できた。

## 2.4 考察

今回のアンサンブル降水予報を用いた流量予測実験では、LETKFによるデータ同化を行った上で初期値を作成し、実際に豪雨が発生した24時間前、18時間前、12時間前からの降水予報を行った。しかしながら、予報値は観測を大幅に過小評価した。

予報が成功しなかった原因の一つとして考えられるのは、今回の豪雨をもたらした降水システムの水平スケールが小さかったため、正しい位置に降水を予報することが極めて困難であったことがあげられる。今回白川流域を襲った豪雨は、2.2章で述べた通り、前線性の集中豪雨であった。また、レーダーや3 kmメッシュモデルの計算結果から、豪雨をもたらした降水システムはいくつかの積乱雲のかたまりで構成される幅 20 km程度のメソスケール降水システムであった。従って、わずか 10 km程度の予報のズレがあれば、地点降水量の予報値は大幅に過小評価してしまう恐れがある。さらに、白川流域面積は 480 km<sup>2</sup>であるため、流域幅は 20 km前後であり、降水システムの幅と同程度であった。従って、求められる予報雨量の位置の精度の許容範囲は数kmしかなく、極めて精度の高い位置の精度が要求される。

こうした要求精度を満たすことは一般的に極めて困難であるため、今回行った降水予報位置を修正する補正方法を取り入れることは、このような集中豪雨による洪水予測を行う上で有効な手法であると考えられる。

予報雨量が過小評価であったもう一つの原因は、今回用いた 3 kmメッシュモデルが、このような集中豪雨を定量的に再現する能力が不十分であった可能性があげられる。一般に、解像度  $x$  km のモデルは、 $5\sim 6x$  km程度以上のスケールの現象しか表現することができない。この条件に従うと、今回の 3 kmメッシュモデルで表現できるのは 15 km $\sim$ 18 kmのスケールの現象であり、幅 10 km程度の大きさを持つ積乱雲を表現するにはやや解像度が足りなかった可能性は否めない。

解像度を上げて、降水現象の再現性を上げることが可能であるが、その場合計算時間が長くなり計算コストが大きくなる。しかし、2 km程度の解像度による実験を行い、解像度の効果を確認しておくことは必要である。

モデル解像度の問題に関するもう一つの解決方法として、予報雨量をバイアス補正する手法が考えられる。気象庁でも、予報モデルで計算された雨量をそのまま予報に使用するのではなく、予報ガイダンスという値に変換してから予報に役立てている。この予報ガイダンスというのは、いわゆるモデルのバイアスを除去した補正值と考えることができる。このような方法も考慮して、今後洪水予測に役立てられる手法の改善を行っていく必要がある。

さらに、アンサンブル洪水予測手法の信頼性を検証するために、今後さらに多くの事例に対して予測精度を調査していく必要がある。

## 参考文献

- 1) Sayama, T., G. Ozawa, T. Kawakami, S. Nabesaka and K. Fukami: Rainfall-runoff-inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin, *Hydrol. Sci. J.*, 57, pp.198-312, 2012.
- 2) Ushiyama, T., Sayama, T., Tatebe, Y., Fujioka, S., Fukami, K.: Numerical Simulation of 2010 Pakistan Flood in the Kabul River Basin by Using Lagged Ensemble Rainfall Forecasting, *J. Hydrometeor.*, 15, 193–211, 2014.
- 3) 佐山敬洋・建部祐哉・藤岡 奨・牛山朋来・萬矢敦啓・田中茂信, 2011年タイ洪水を対象にした緊急対応の降雨流出氾濫予測, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 69, No. 1, p. 14-29, 2013.
- 4) Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D*, 230, 112-126, 2007.
- 5) Miyoshi, T and M. Kunii: 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.
- 6) Seko, H., T. Tsuyuki, K. Saito, and T. Miyoshi, 2013, Development of a two-way nested LETKF system for cloud-resolving model, *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic, and Hydrologic Applications (Vol. II)*, DOI 10.1007/978-3-642-35088-8\_20, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 489-507.
- 7) Saito, K., H. Seko, M. Kunii and T. Miyoshi: Effect of lateral boundary perturbations on the breeding method and the local ensemble transform Kalman filter for mesoscale ensemble prediction, *Tellus*, 64, pp.1-23, 2012.
- 8) 土木学会九州北部豪雨災害調査団：平成24年7月九州北部豪雨災害調査団報告書, <http://committees.jsce.or.jp/report/node/56>
- 9) 建部祐哉・佐山敬洋・牛山朋来・藤岡 奨・田中茂信：チャオプラヤ川流域における長期降雨流出氾濫解析, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 69, No. 4, I\_457-I\_462, 2013.
- 10) Oldenborgh, G. J.V., Urk, A. V., Allen, M. R.: The absence of a role of climate change in the 2011 Thailand floods, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, pp. 1047-1049, 2013.
- 11) Komori, D., Nakamura, S., Kiguchi, M., Nishijima, A., Yamazaki, D., Suzuki, S., Kawasaki, A., Oki, K., Oki, T., 2012,

## 1.2 短時間急激増水に対応できる洪水予測に関する研究

Characteristics of the 2011 Chao Phraya River flood in central Thailand, Hydrol. Res. Lett., 6, 41-46, doi.10.3178/HRL.6.41.

## STUDY ON FLOOD PREDICTION APPLICABLE TO FLASH FLOODS

**Budget** : Grants for operating expenses (General Account)

**Research Period** : FY2011-2015

**Research Team** : Water-related Hazard Research Group

**Author** : Yoichi Iwami, Takahiro Sayama, Tomoki Ushiyama

This project investigates the physical downscaling of a global scale weather prediction using a meso-scale weather model, particularly WRF model, and rainfall-runoff-inundation predictions with RRI model for providing useful information for short-term flood predictions including flash flooding in developing countries. In this progress report, we present the application of Ensemble Kalman Filter (EnKF), in particular Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF), to the WRF model to assimilate meteorological data including in-situ and airborne sensors as well as GPS precipitable data for improving weather prediction and quantify its reliability. The hind-cast of typhoon events in 2012 in the Shirakawa River basin in Kumamoto Prefecture with 33hr lead time and their application to the RRI model originally showed underestimations of flooding. However, a simple correction method by shifting the location of predicted rainfall improve the accuracy of flood predictions.

**Key words:** Flood prediction, physical downscaling, WRF model, RRI model, Ensemble Kalman Filter