

## 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、宮本守、牛山朋來

### 【要旨】

短時間急激増水に対する洪水予測を実現するために、全球数値気象予報モデルを領域気象モデル（WRF モデル）により物理的（力学的）にダウンスケーリングした降雨の流出過程から洪水氾濫までを一体的に予測する技術を開発した。領域気象モデルには局所アンサンブル変換カルマンフィルタと呼ばれるデータ同化手法を導入し、予測精度の向上を図った。さらに降雨・流出・氾濫モデル（RRI モデル）に WRF モデルでダウンスケーリングした結果を入力することで洪水氾濫域を予測することができた。RRI モデルによる解析に関しては、タイ・チャオプラヤ川流域や白川流域などを対象に実施した。チャオプラヤ川流域では 52 年間連続的に流出量・氾濫量を計算し、水収支の観点から降水量と氾濫量との関係を分析した。白川流域では、アンサンブルの降雨予測結果を降雨流出氾濫(RRI)モデルに入力した結果、アンサンブル平均では今回の洪水を過小評価したが、降水分布の位置を補正することによって洪水発生の有無の予測レベルまで精度向上することができた。

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

### 1. はじめに

局地的豪雨の発生に起因する洪水被害が近年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迅速な避難・水防活動が難しいため、多数の死者を伴う甚大な被害になる。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は、限られた時間内で降雨の時空間分布を予測し、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、流出氾濫の一体的な解析手法について研究を進めた<sup>1)</sup>。

上記の目標を達成するため、パキスタン・カブール川の 2010 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>。これらの結果を踏まえた上で、降水量の予測精度向上と予測の不確実性評価を目的としてアンサンブルカルマンフィルタを領域気象モデルに導入

する研究を実施した。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(Local Ensemble Transform Kalman Filter; LETKF)<sup>3),4)</sup>の枠組みで GPS 可降水量のデータを同化した。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。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た<sup>5)</sup>。

## 2. アンサンブルカルマンフィルタを用いた降雨流出予測実験

### 2.1 予測モデル

本研究では、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の一種である LETKF を用いた。アンサンブルカルマンフィルタは、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が、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）を自動的に

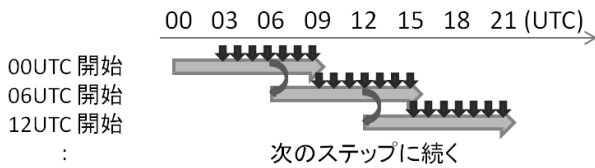


図-1. LETKF の計算進行の概念図.  
Miyoshi and Kunii (2011) 4)より入手

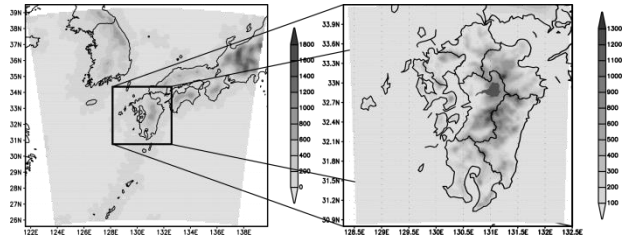


図-2. モデル計算領域。

濃淡は標高 (m)、熊本県北東部の黒い影が白川流域

与えるなどの最新の機能を有している 4)。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。

LETKF によっ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上海上航空機観測(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 1 時間毎の瞬間値(風、気温、湿度)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 6)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。

## 2. 2 降雨予測手法

LETKF による計算の進め方を図-1 に示す。右向きの大い矢印が 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-1 には 1 種類の LETKF 計算のみを示しているが、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

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

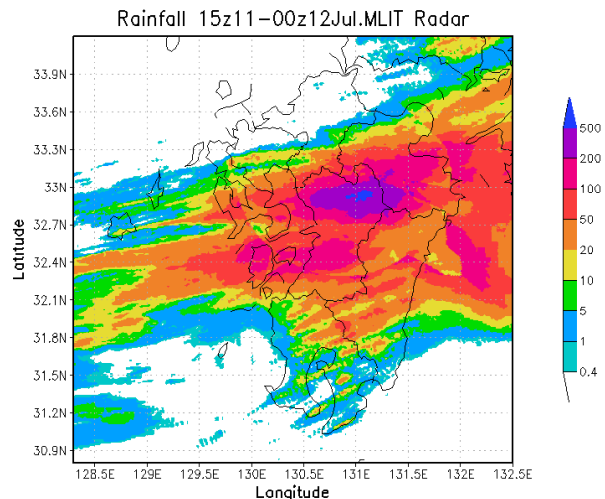


図-3. 7 月 12 日 00 時~09 時 (日本時間) の国交省 C バンドレーダー雨量計による積算雨量 (mm)

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

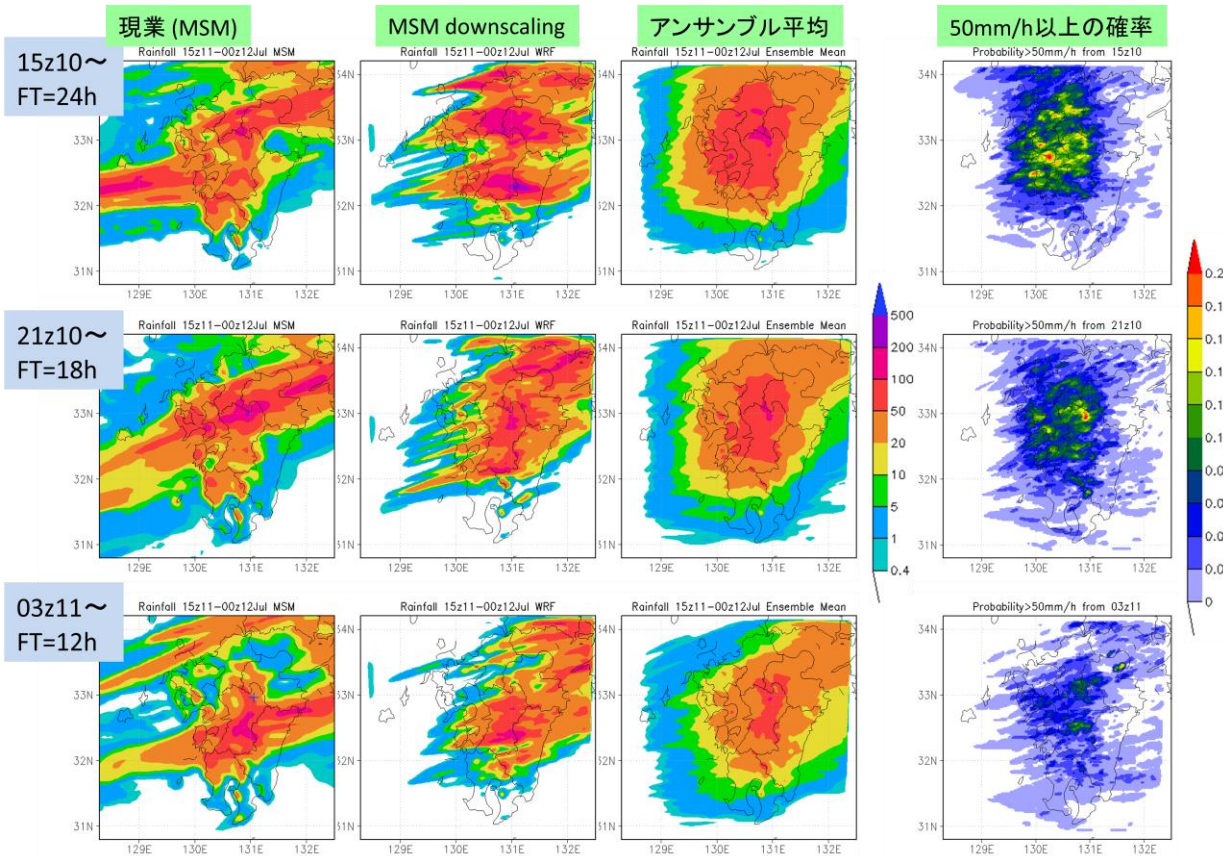


図-4. 33時間予報による7月12日00時～09時（日本時間）の降水積算値。左から、MSM 現業予報、MSM のダウンスケーリング、アンサンブル予報、アンサンブル予報による50mm/h以上の雨が降る確率。横の列は、上から24時間予報、18時間予報、12時間予報である。

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回予報されており、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。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。

本稿では、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）の解析を示す。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考察した。計算領域は、熊本県を中心に九州全域を含む、図-2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-2左のように設定した。モデルの設定を表-1に示す。

### 2.3 平成24年7月九州北部豪雨の概要

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。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



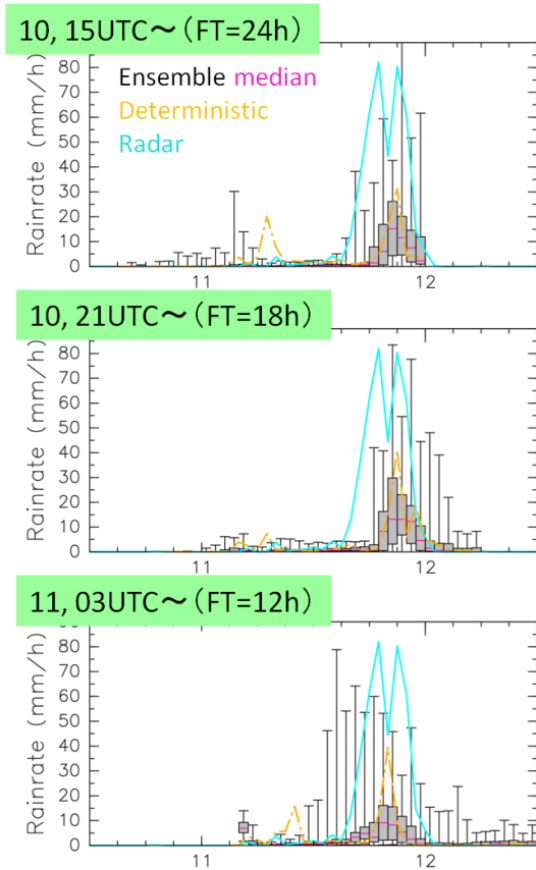


図-5. 白川流域平均降水量の時間変化。灰色のバーは、アンサンブルの25%~75%のquantile、縦棒はアンサンブルの0%~100%、ピンク色はアンサンブルメディアン、水色はレーダー観測値、黄色は決定論的予報である。

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<sup>9</sup>。

## 2. 4 降雨時予測結果

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。

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。

## 3. RRIモデルによる降雨流出氾濫予測

本研究のもう一つの柱は、降雨を入力して河川流量から洪水氾濫までを一体的かつ迅速に解析する降雨流出氾濫モデル(RRIモデル)の開発である。

### 3.1 チャオプラヤ川流域における流出氾濫解析

2011年タイ洪水を対象に、長期連続の降雨流出氾濫計算<sup>9</sup>を実行し、その結果の水収支を解析した。2011年タイ・チャオプラヤ川流域の洪水は、平年よりも約1.4倍の降雨が観測史上最大の洪水被害をもたらした。この降雨量を大きいとみるか、小さいとみるかによって、この災害の解釈は大きく異なってくる。例えば、Oldenborghら<sup>10</sup>は降雨量の年々変動から2011年の降雨量が顕著に大きくなかったことを指摘し、洪水被害の主たる原因は降雨量そのものではなく、洪水管理にあったと結論付けている。一方で、降雨量の約7割が蒸発する環境下では、たとえ1.4倍の降雨量でも流出量は2.4倍になるという

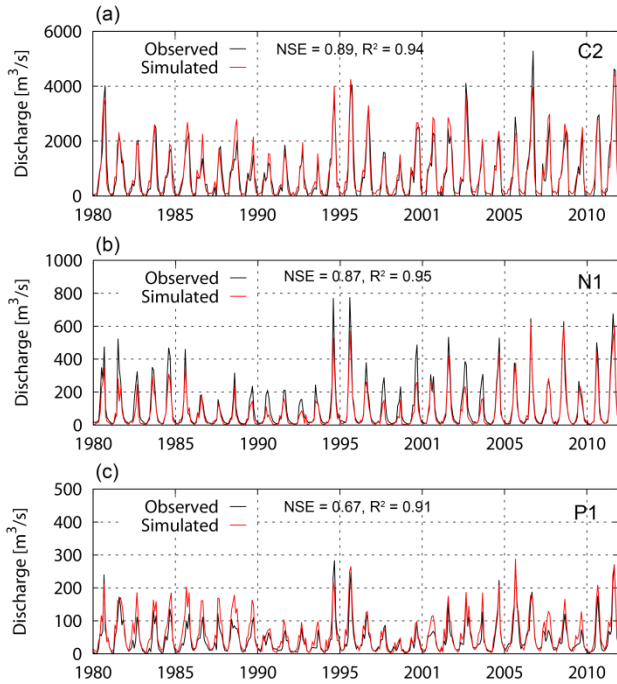


図-6.RRI モデルによる長期流出計算結果

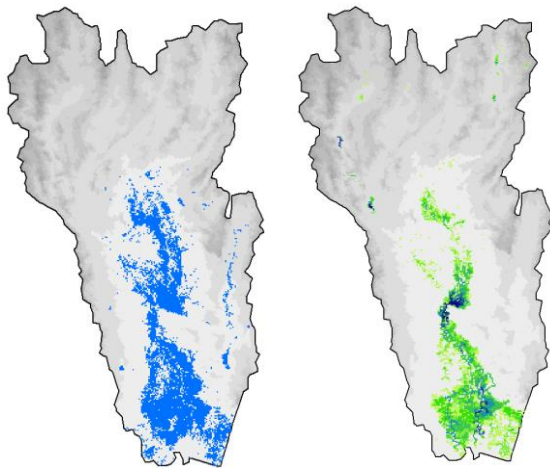


図-7.2011年10月中旬の氾濫計算結果比較  
(左)衛星画像による浸水想定域、(右)RRIモデル

指摘もある<sup>1)</sup>。本研究はこのような議論をより定量的に行うため、降雨量の変動に対する、河川流量・洪水氾濫量・土壌水分量変化の応答特性を分析する。具体的には、チャオプラヤ川流域に適用した RRI モデルを用いて 52 年間の連続的な流出氾濫シミュレーションを実行し、その計算結果を水収支の観点から解析することによって、平年より 1.4 倍の降雨量が流域の洪水にとってどのような意味を持つのかを分析した。

地上観測雨量とペンマン・モンティース法によって推定した蒸発散量を RRI モデルに入力し、1960 年から 2011 年までの長期連続計算を実行した。ダムを考慮しな

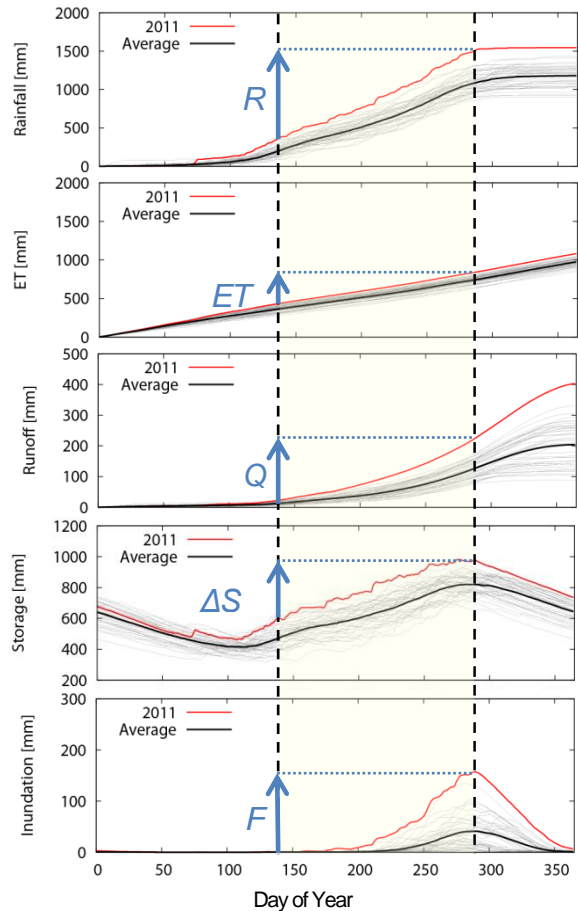


図-8.流域全体の降水量・蒸発散量・流出量・流域貯水量・氾濫量(1月1日を起点として、各年を灰色線、平年値を黒色線、2011年を赤色線で表示。)

い自然流況下の場合と、ブミボン・シリキット両ダムからの観測流量を境界条件とする場合の二通りで計算した。モデル検証は、流域の複数地点における月流量・水位の他、2005年から2011年までの下流部における最大浸水面積、さらに2011年については複数地点の日流量・水位、現地計測した最大浸水位の観点から検証した。その結果、月流量はナッシュ指標で0.7から0.8程度(図-6)、浸水面積の相対誤差は20%程度(図-7)、2011年について氾濫域の浸水深は約1m以内の誤差で再現できることを確認した。

自然流況のシミュレーション結果に基づいて、各年の降水量、実蒸発散量、流出量、土壌の貯水量および氾濫量を流域平均で算定した(図-8)。図中の赤線は2011年の計算結果を示しており、蒸発散量を除いては、平年値(黒線)との乖離が明確である。これを定量的に解釈するために、各年の降水量と氾濫量との関係を調べた。図-9に示すように、縦軸には各年ピーク時の氾濫量をプロットすることにし、横軸にはその生起時刻からさかのぼって

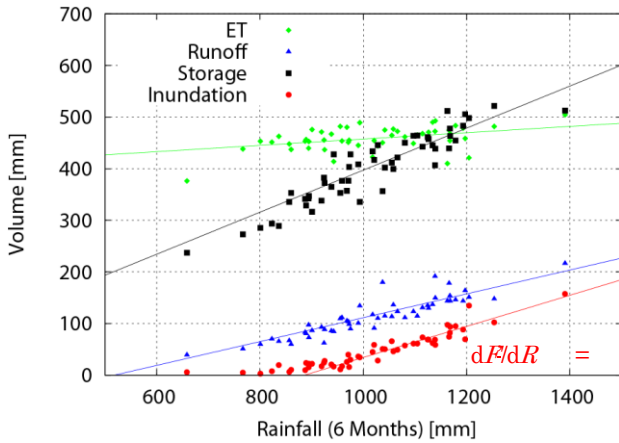


図-9. 各年6か月降水量と同期間の蒸発散量・土壌水分量変化・流出量・氾濫量（ダムなしのケース）

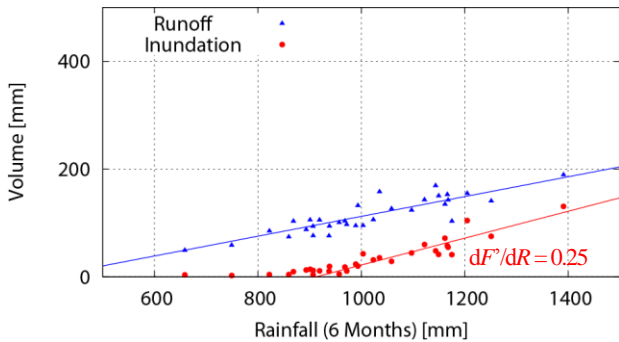


図-10. 各年6か月降水量と氾濫量（ダムありのケース）

6か月間の流域平均雨量をプロットした(6か月雨量がピーク氾濫量と最も相関が高いため)。図-9の縦軸は、各年のピーク氾濫量(F)のほか、同6か月間の総蒸発散量(ET)・総流出量(Q)・土壌水分量の変化(ΔS)をプロットしている。この図から、降雨量(R)と氾濫量との関係を示す回帰直線の傾き(dF/dR)は0.30となることが分かる。

$$\frac{dF}{dR} = 1 - \frac{dQ}{dR} - \frac{dET}{dR} - \frac{d\Delta S}{dR} \quad (1)$$

この傾きの意味を考えるうえで、水収支式から得られる式(1)が役に立つ。上式の中でチャオプラヤ川流域のdET/dRはゼロに近い。dQ/dRは山地小流域では出水時に1に近くなることが予想されるが、流域面積が大きく、勾配も緩い本流域では0.23となる。すなわち、降雨量が100mm増えても流出量は流域平均で23mm相当しか増えない。その結果、氾濫を含めた流域流域貯水量の増加(dF/dR+d(ΔS)/dR)が相対的に大きくなり、上述の通りdF/dRは0.30となる。

この値は、流域平均雨量が200mm増加する(過去の洪

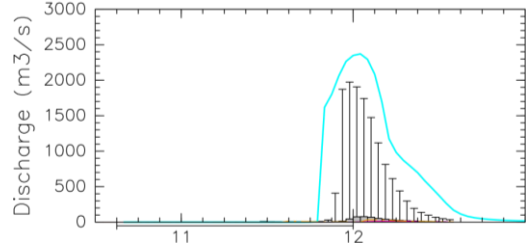


図-11. 白川流域末端におけるハイドログラフ。色の対応は図-5と同様である。

水より200mm増加すると、氾濫量が流域全体で60mm増加することを意味する(流域の10%が氾濫すると仮定すれば、浸水深の増加は600mmになる)。また60mmに流域面積をかけて体積換算すれば約100億m³の氾濫量増加となる。これはシリキットダムの総貯水量(95億m³)に匹敵する量である。なお、図-10は両ダムからの放流量を境界条件にして計算した場合であり、この場合はdF'/dR=0.25となる。この場合でも、200mmの雨量増加は55mm(=82億m³)の氾濫量増加に結び付くことを意味しており、その氾濫量増加は本解析から推定された両ダムの氾濫量低減効果(44億m³)と比べても小さいことが分かった。すなわちチャオプラヤ川流域において一雨季の降水量が200mm増加することは非常に大きなインパクトをもたらし、2011年の降水量が過去の洪水をもたらした降水量に比べていかに大きいものであったかを示唆している。

### 3.2 白川流域における流出氾濫解析

前述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480km²、図-2)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>4),5)</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。

図-11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-11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報システムでは観測され



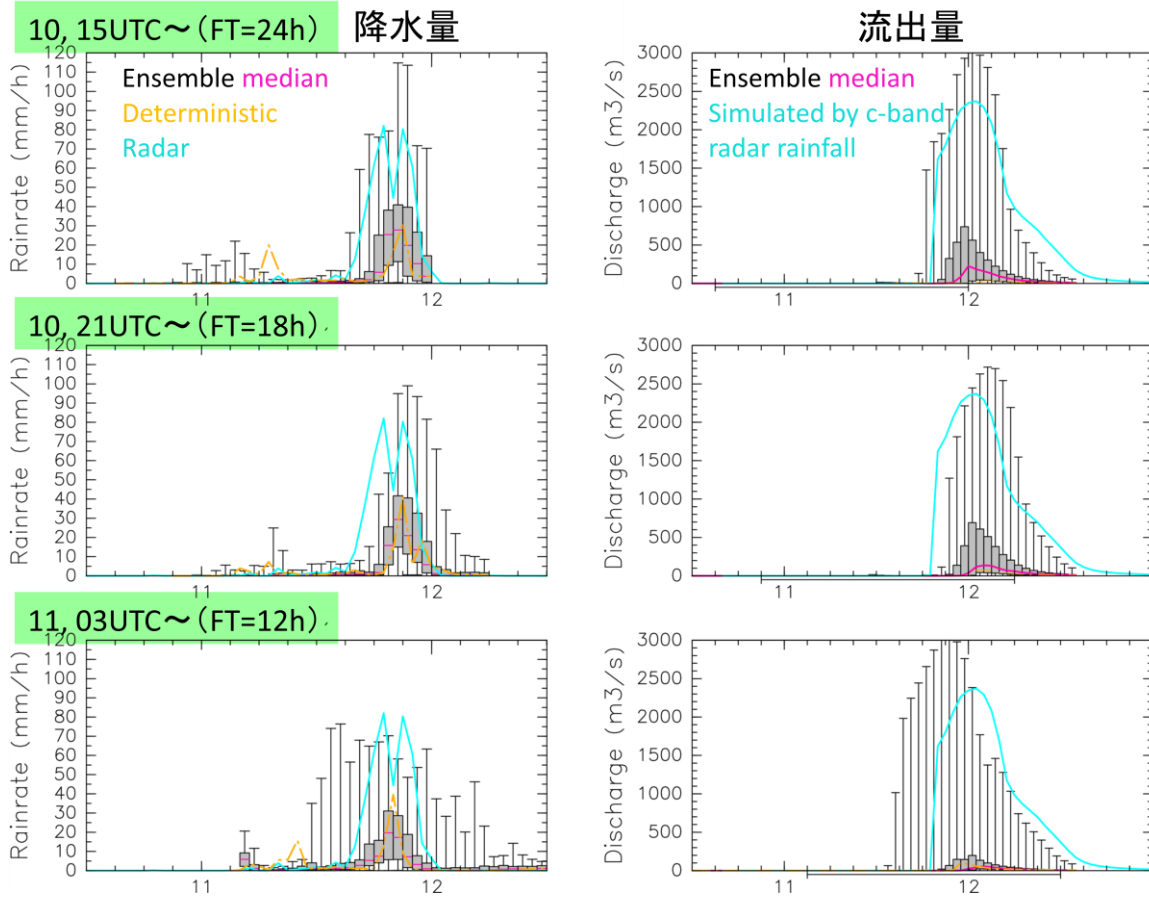


図-12. 降水位置の補正後の白川流域平均降水量（左）とハイドログラフ（右）。凡例は図-5、6と同様である。

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。

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-12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-12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、洪水発生の有無の予測レベルまで精度向上することができた。図-13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-13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-13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当然とも言えるが、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。

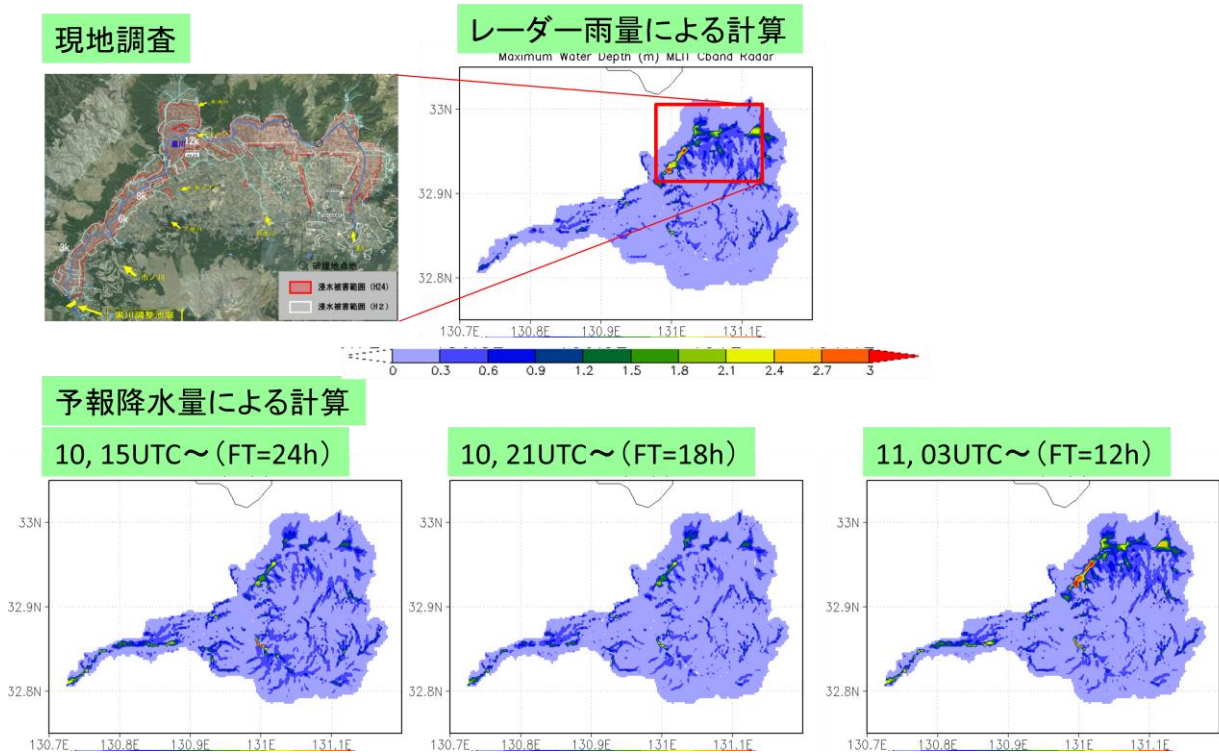


図-13. 洪水による最大浸水深の分布。左上：現地調査による浸水分布、赤影が平成 24 年の浸水被害範囲である（土木学会九州北部豪雨災害調査団報告書より<sup>8)</sup>。上中：レーダー観測雨量から計算した浸水深分布。最も薄い青色は流域の範囲を示し、濃い青から赤までが浸水域である。下の 3 つは位置ずれ補正後の予報降水量を用いた浸水分布で、左から 24 時間予報、18 時間予報、12 時間予報である。

#### 4. まとめ

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、2.3 節で述べた通り、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、5~6x 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~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は可能であるが、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。

### 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) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 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, Characteristics of the 2011 Chao Phraya River flood in central Thailand, *Hydrol. Res. Lett.*, 6, 41-46, doi.10.3178/HRL6.41.

## STUDY ON FLOOD PREDICTION APPLICABLE TO FLASH FLOODS

**Budgeted** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2011-2015

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

**Author** : IWAMI Yoichi

MIYAMOTO Mamoru

USHIYAMA Tomoki

**Abstract** : This project investigated 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 improves the accuracy of flood predictions.

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