

## 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、領域気象モデルにアンサンブルカルマンフィルターを導入した。これにより観測データを同化して予測精度を向上させるとともに、アンサンブルで予測の信頼性を評価できるようになった。6時間・33時間のリードタイムを有する降水量を予測実験し、その出力を RRI モデルに入力した結果、アンサンブルの洪水流出予測は、決定論的予測に比べて精度が高いことを確認した。また RRI モデルの改良と応用に関する研究としては、タイ・チャオプラヤ川流域を対象に 52 年間連続的に流出量・氾濫量を計算し、その結果を水収支の観点から解析することによって、降水量と氾濫量との関係を分析した。

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、その解析事例として 2011 年の台風 12 号・15 号を対象に降水量をアンサンブルで予測し、RRI モデルに入力することで、ダム流入量のアンサンブル予測実験を行った。また RRI モデルの開発・応用研究として、タイ・チャオプラヤ川流域を対象に長期連続の流出氾濫解析を行い、その結果を水収支の観点から解析することによって、降雨量と洪水氾濫量との関係を分析した。

## 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、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>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、アンサンブルカルマンフィルターの一つであり、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）を自動的に与えるなど最新の機能を持つ<sup>5)</sup>。

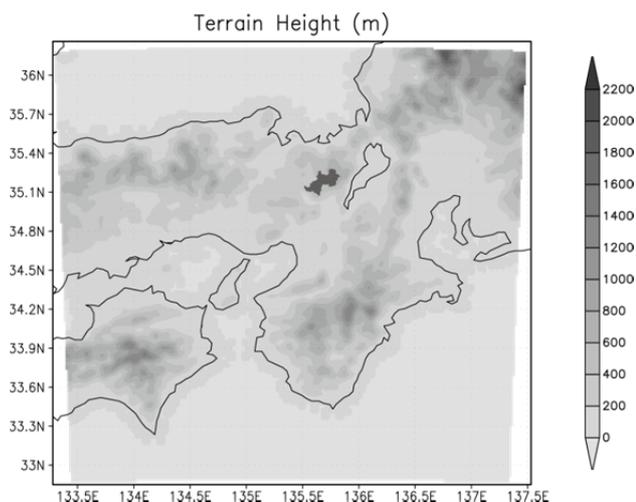


図-1. モデル計算領域。影は標高(m)を表わす。  
琵琶湖の西の黒い影が日吉ダム流域を示す。

表-1. WRF モデル設定

格子数	126×126×40
水平格子間隔	3km
計算時間 1	2011年8月31日12時～9月6日3時
計算時間 2	2011年9月19日0時～23日15時
初期、境界条件	気象庁MSM、NCEP GFS4
雲物理過程	Lin スキーム(氷相を含む)
境界層過程	MYNN2.5 スキーム
土地利用分布	USGS 30 秒間隔

本研究では、2011年に紀伊半島で大きな被害をもたらした台風第12号と台風第15号を解析対象とした。そして、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である。計算領域は、台風に伴う降水が多かった関西を中心に、図-1のような領域を設定した。格子間隔は3kmである。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)による、PREPBUFRと呼ばれる全球数値天気予報システムで使われた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、気象台測候所32か所(風、気温)の1時間毎の瞬間値である。データ数は6時間あたり東西風・

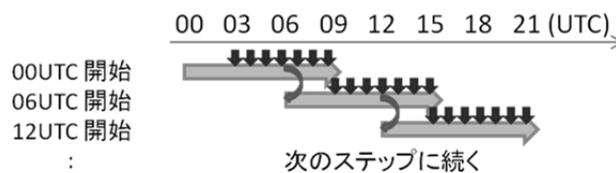


図-2. LETKF の計算進行の概念図。

Miyoshi and Kunii (2011)<sup>9)</sup>より入手

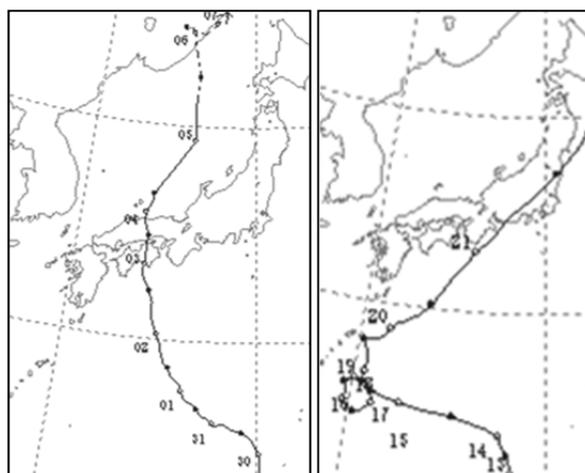


図-3. 台風第12号(左)と台風第15号(右)の気象庁ベストトラック。数字は日付を表わし、白丸は00UTC、黒丸は12UTCの位置。

[http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/route\\_map/bstv2011.html](http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/route_map/bstv2011.html) より入手

南北風・気温は1000～5000個前後、比湿は10個程度である。これらは、インターネット上から取得することができる。

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21とした。それぞれのアンサンブルメンバーの初期値は、適当なスプレッド(アンサンブルメンバーばらつき)を持つように、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て2日間スピニアップを行った予報値を用いた。

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9時間である。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(21メンバー)を得る。得られた解析値は

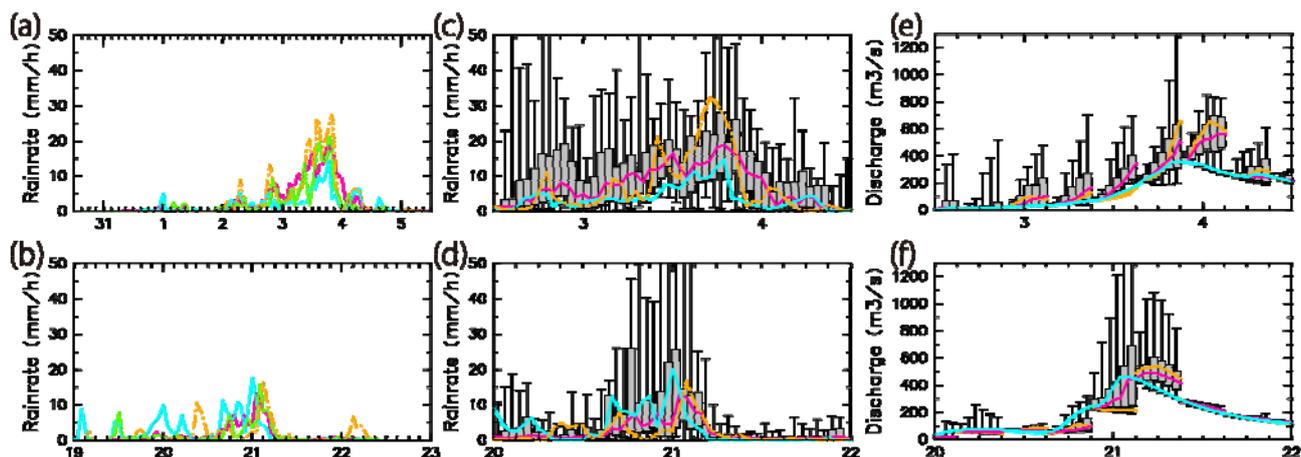


図4. 台風第12号(a)と台風第15号(b)による雨量の時系列(ハイトグラフ)(mm/h)。各線は、決定論的予報(オレンジ)、MSMオリジナル(緑)、アンサンブルメディアン(紫)、レーダー観測(水色)である。なお予報値は6時間予報値である。横軸の数字は日付(UTC)を表す。(c)、(d)は同様にアンサンブル予報の情報を含めた雨量の時系列(ハイトグラフ)である。影をつけたボックスが25%~75%の分布、縦棒はすべてのアンサンブルメンバーの範囲、ピンク折れ線はアンサンブルメディアン、オレンジと水色は(a)、(b)と同じく決定論的予報とレーダー観測値である。(e)、(f)は流量予測値(ハイドログラフ)である。凡例は(c)、(d)と同様である。

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21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、後の議論に用いられる予測降水量は、各9時間予報の後半6時間分を用いた。この場合の予報リードタイムは6時間となる。また、いくつかの時点で33時間予報を行ったが、この場合はLETKFで得られた21メンバーの解析値を初期値として、MSMの33時間予報を境界条件として予報を行った。MSMは現在1日8回予報されているが、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>6)</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、あらかじめ効果が高いことが判明している、各メンバーの初期値のスプレッドから作成した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。対象流域は琵琶湖の西に位

置する日吉ダム流域(流域面積320km<sup>2</sup>、図-1)である。用いたモデルは、RRIモデルである<sup>1), 3)</sup>。これを、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、LETKFの6時間毎の予報サイクルに応じて更新された6時間先までの予測降水量と、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使って6時間毎に流出予測を繰り返す、という方法を採用した。33時間予報の場合も、それ以前のレーダーデータと予測降水量を組み合わせた雨量分布を用いた。なお、降水量の予測期間以降は、ゼロの降水量を流出計算に使用した。

## 2.2 台風12号と台風15号の特徴

2011年台風第12号と第15号は、ともに関西付近を通過した(図-3)。第12号は非常にゆっくりと四国から中国地方を縦断したため、紀伊半島を中心に多大な降水をもたらし、奈良県上北山観測点の雨量は8月31日から9月4日までの雨量は1,812mmと、9月の月間降水量の4倍以上となった(図-4a)。それによる土砂災害、浸水、河川氾濫等により和歌山奈良三重などで死者78名、行方不明者16名となる大災害となった。

台風第15号は台風第12号で被害を受けた直後に襲来し、紀伊半島南海上を通過した21日00UTCに

は中心気圧が 950hPa となる強い勢力を保っていた。この台風は南大東島の西海上にしばらく留まり(図-3)、湿った空気を本州南岸に供給したことから、九州四国南部を中心に 1,000 mm を越える降水量をもたらした。紀伊半島でも三重県大台町宮川で 794 mm に達した。しかし、本州南岸に近づいた 21 日以降は比較的速い速度で進み、静岡県に上陸し福島県沖に抜けるまで関東から東北地方を縦断した。

このように二つの台風は社会的にも大きな影響を与えた台風であった。台風第 12 号の全国での死者行方不明者は 94 名であり、2004 年 10 月の台風第 23 号(98 名)以来の多さであった。その多くは大雨による土砂災害が原因であり、降水量の予測検証を行う対象として適当なものと言える。

## 2.3 結果

### 2.3.1 6 時間予測

図-4a、b に日吉ダムの流域平均雨量の時系列(ハイトグラフ)を示す。この図に示した予報値は、図-2 で示した 6 時間毎の予報サイクルの 6 時間予報値をつなげたものである。図-4a は台風第 12 号のものである。いずれの降水強度も 9 月 3 日に増加しており、レーダー観測の結果と一致していた。しかし、絶対値はどの予報値も過大評価となっており、特に決定論的予報は過大評価傾向が大きかった。図-4b は台風第 15 号のもので、台風第 12 号と同様降水のタイミングはほぼ一致しているものの、最大強度となる時刻が 1~2 時間遅れたり、20 日 0 時頃の観測雨量が予報できないなどの不一致があった。従って、6 時間先までの予報では比較的観測値に近い雨量予報値が得られるが、精度に問題が残ることが明らかになった。

各アンサンブルメンバーの予報結果を含めた予測降水量のハイトグラフを図-4c、d に示す。ここでは、降雨が強かった 2 日間を拡大表示している。図-4c の台風第 12 号の例では、決定論的予報やアンサンブル予報のメディアンがほぼすべての期間で過大評価していた。しかし、観測値はアンサンブル予報の範囲に含まれており、多くの期間でアンサンブルの 25%~75%分位に入っていた。図-4d の台風第 15 号の例でも、アンサンブル予報の 25%~75%分位はすべての観測値の変動をカバーしていた。このように、各アンサンブルメンバーを考慮することにより、確率予報の範囲内に観測値が収まり、予報の取りこぼしが避けられることがわかる。

図-4c、d の雨量を用いて求めたハイドログラフを図-4e、f に示す。ここでは、6 時間毎にアンサンブル流量予測のばらつきが 0 になっているが、これは 2 章で述べたように、6 時間毎に得られる予報雨量とそれまでのレーダー観測雨量をつなげて流出計算をしているためである。決定論的雨量予報に基づく流出予測はしばしば観測値から大幅に外れた予測流量を示すが(例えば、図-4e の 3 日 18 時~4 日 3 時、図-4f の 20 日 21 時~21 日 9 時)、アンサンブル流出予測はより観測に近い値を示し、さらに観測値はアンサンブル予測の範囲に含まれている。このように、流出予測においても決定論的予測に対するアンサンブル予測の優位性が見て取れる。

以上により、雨量の大きい時間帯における 6 時間予測について、決定論的予報に対するアンサンブル予報の信頼性の高さが示された。6 時間先までの流量予測については、台風第 12 号第 15 号ともに、アンサンブル予測がより信頼性の高いメディアンを予測することができ、またアンサンブルメンバーの広がり観測流量の出現可能範囲を示すことができた。

### 2.3.2 33 時間予測

台風第 12 号の 33 時間予測の結果を図-5 に示す。図-5a は 9 月 2 日 21 時を初期値とする降水予報値を RRI モデルに与えて計算した結果である。アンサンブル予測流量は、ピーク流量が現れる時刻については 3 日 20 時~4 日 0 時で観測とほぼ一致し、決定論的予報も同様であった。しかしながら、流量が大幅に過大評価となった。また、アンサンブルスプレッドは観測値に比べてかなり大きく、3 倍以上の流量を予測したメンバーもあった。一方、観測流量はアンサンブルスプレッドの範囲に収まっており、予測は観測結果をカバーしていることからある程度有用な情報が得られたと考えることもできる。しかし、アンサンブル予測は決定論的予測よりも悪い結果となった。

同様に、図-5b は 2 日 15 時を初期値とする予測であり、図-5a よりも 6 時間早い時点での 33 時間予測である。この時点の決定論的予測は観測値を大幅に過大評価し、ピーク流量の出現を実際より 8 時間程度早く予測した。アンサンブル予測では、ピーク流量出現時刻は決定論的予測とほぼ同じであったが、アンサンブルメディアンが観測流量に比較的近くなるという改善があった。さらに 6 時間早い 2 日 9 時

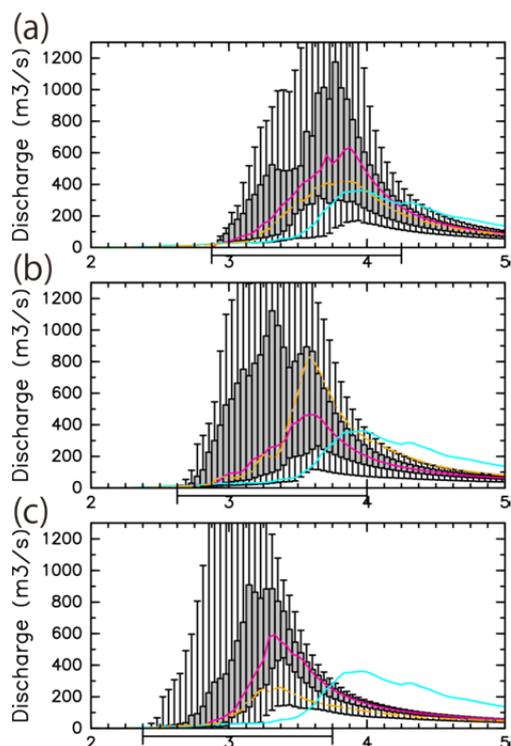


図-5. 台風第12号の33時間アンサンブル流量予測ハイドログラフ。影をつけたボックスはアンサンブル予測の25%~75%分位、縦の棒はすべてのアンサンブルメンバーの範囲、紫はアンサンブルメディアン、オレンジは決定論的予測値、水色はレーダー観測から求めた流量である。横軸下の横線は、用いた予報雨量の予報期間を表す。(a)は9月2日21時からの33時間予測、(b)は9月2日15時からの33時間予測、(c)は9月2日9時からの予測である。

を初期値とする図-5cでは、いずれの予測も12時間以上早いピーク流量の出現を予測してしまった。

図-5に示した台風第12号の33時間予測では、ピーク流量が現れる3日21時の24時間前にあたる2日21時からの予測(図-5a)のアンサンブル予測が辛うじて観測流量をカバーしていたが、その他の予測はすべて失敗に終わった。これは、この台風第12号の進行速度が予報よりも遅く、MSMの予報が台風的位置をうまく表現できなかったことが原因と考えている。

台風第15号に対する同様の予測結果を図-6に示す。ピーク流量出現時刻の約24時間前の20日3時を初期値とする予測(図-6a)では、決定論的予測・アンサンブル予測ともに観測流量に近く、観測流量はすべてアンサンブル予測の範囲内に収まっていた。さらに6時間早い19日21時を初期値とする予測(図-6b)では、ピーク流量出現時刻は概ね正しいものの、

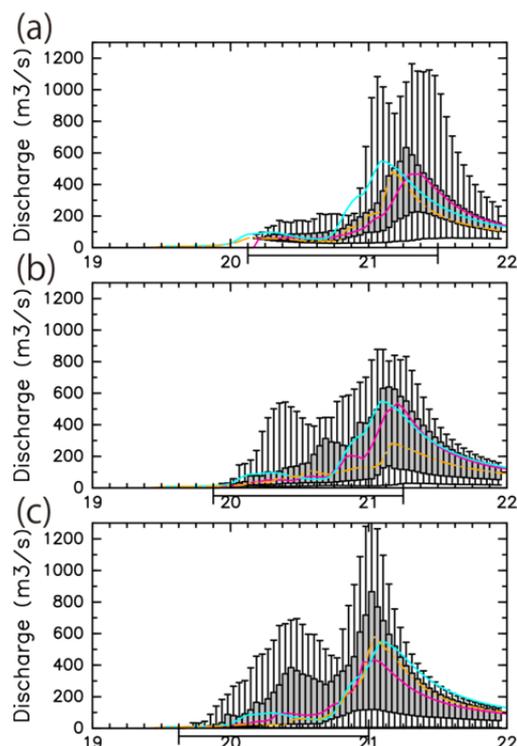


図-6. 台風第15号の33時間アンサンブル流量予測ハイドログラフ。凡例は図-7と同様。(a)は9月20日3時からの33時間予測、(b)は9月19日21時からの33時間予測、(c)は9月19日15時からの予測である。

決定論的予測が流量を大幅に過小評価していた。

それに対して、アンサンブル予測はメディアンが観測とよく一致した。最後に、さらに6時間早い19日15時を初期値とする予測(図-6c)では、決定論的予測が観測と近く、アンサンブル予測も観測に近い予測を示していた。

図-6に示した台風第15号の33時間予測は、予測精度は予測の初期時刻にそれほど依存せず、どの時刻からの予測についてもピーク流量およびピーク流量出現時刻が観測に近く、比較的精度の良い予測流量を示した。これは、気象庁MSMの予測精度が良かったためと考えられる。しかし、19日21時を初期値とする予測(図-6b)では、決定論的予測の予測精度が悪く、アンサンブル予測の優位性が示された。

## 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、6時間先の予測については、決定論的予測に比べて予測精度が向上することが示された。また、33時間先の予測については、台風第12号の例では十分な予測精度が得られなかったものの、台風第15

号については流出ピークの 33 時間前の時点から有用な予測が可能であることが示された。これは、今回の領域アンサンブル予報を用いた流出予測が、条件によっては利用価値があることを示している。

実際の河川管理においては、1 回の予測だけを用いるのではなく、時間が進むにつれて予測を更新し、最新の予測と過去の予測を比較しながら管理方針を議論することが可能である。今回の台風第 12 号のように、予測流量が予測時刻によって安定しない場合には、予測の信頼性が低いと考えられるので、十分注意する必要がある。一方で、台風第 15 号のように、予測流量が予測時刻によらず一定の範囲に収まっている場合は予測の信頼性が高いと判断し、河川管理にアンサンブル流量予測情報を役立てることが可能である。このような考え方を加味することで、アンサンブル流量予測は河川管理に対して利用価値があると考えられる。

今回の実験では、2 つの事例についてアンサンブル降水予報と流量予測を行った。この 2 つの事例の予測精度は大きく異なり、予測の信頼性の違いが明確になった。本研究の実験設定では、計算領域が比較的小さいため、流量予測結果は MSM の降水予報精度に大きく依存すると考えられる。今回も、2 つの事例の予測精度の違いは、MSM の精度に依存する部分が大きいと考えられる。MSM の降水予報精度に対する依存性を少なくするためには、より広い領域でアンサンブル予報を行う必要がある。しかしながら、領域を広げるためには空間解像度が犠牲になる。この点について、適切な領域の大きさと空間解像度の関係を探っていくことも重要である。

さらに、今回の領域アンサンブル予報の対象領域が狭かったため、側面境界の影響を大きく受けた。そのため、アンサンブルスプレッドを維持するために側面境界摂動を導入した。今回は、初期値由来の側面境界摂動を与えたが、この摂動自体のスプレッドは、例えば週間アンサンブル予報のものに比べて東西風で 4 倍程度と比較的大きかったため、予報結果のスプレッドも大きなものになった。この側面境界摂動の性質も予報結果を左右する要因であるため、さらなる検討が必要である。

計算時間については、今回はワークステーション (Intel Xeon E5-2687W 3.1GHz、8core、1CPU) を用いて計算しており、6 時間毎にデータ同化を行う LETKF を含む計算では、24 時間分の計算に約 11 時間、また 33 時間予報の計算には約 17 時間かかった。

しかし、この点については、今後計算機を増やして並列計算を行う他、スーパーコンピュータを用いることで解決できると期待される。

このアンサンブル洪水予測手法の信頼性を検証するために、今後様々な事例に対して予測精度を調査していく必要がある。

### 3. RRI モデルによる長期連続の降雨流出氾濫解析

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。本年度は 2011 年タイ洪水を対象に、長期連続の降雨流出氾濫計算<sup>8)</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>9)</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 倍になるという指摘もある<sup>10)</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する。

#### 3.1 降雨流出氾濫シミュレーション

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。ダムを考慮しない自然流況下の場合と、ブミポン・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。

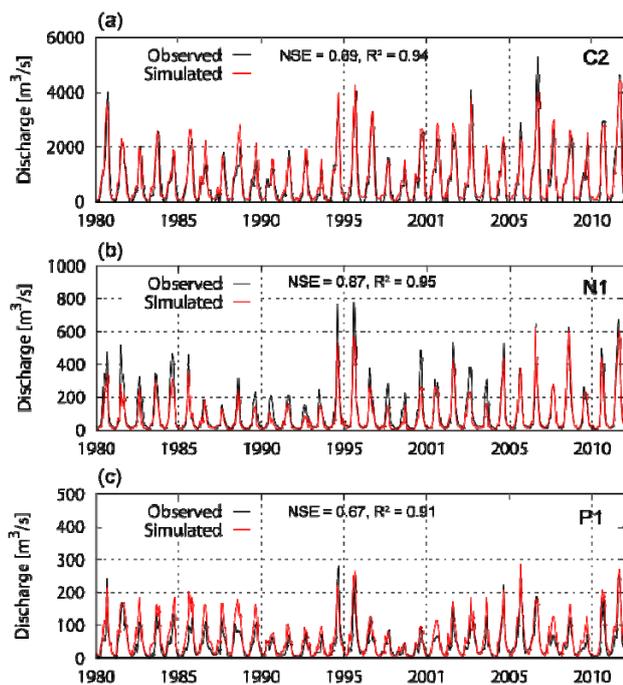


図-7. RRI モデルによる長期流出計算結果

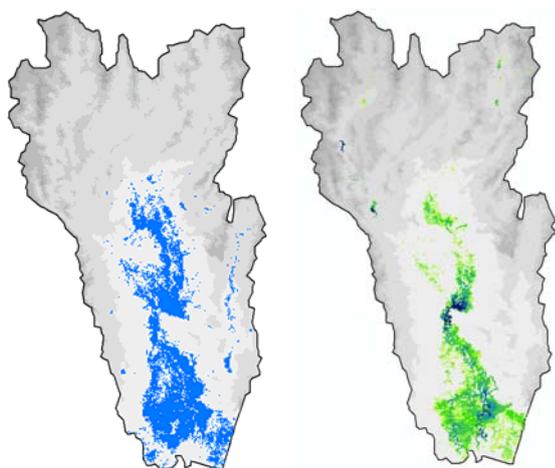


図-8. 2011 年 10 月中旬の氾濫計算結果比較  
(左)衛星画像による浸水想定域、(右)RRI モデル

その結果、月流量はナッシュ指標で 0.7 から 0.8 程度(図-7)、浸水面積の相対誤差は 20%程度(図-8)、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。

### 3.2 解析結果と考察

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-9)。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-10 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 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-10 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( $\Delta S$ )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。上式の中でチャオブラヤ川流域の  $dET/dR$  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 100 mm 増えても流出量は流域平均で 23 mm 相当しか増えない。その結果、氾濫を含めた流域貯水量の増加( $dF/dR + d(\Delta S)/dR$ )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(過去の洪水より 200 mm 増加する)と、氾濫量が流域全体で 60 mm 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 600 mm になる)。また 60 mm に流域面積をかけて体積換算すれば約 100 億  $m^3$  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  $m^3$ )に匹敵する量である。

なお、図-11 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、200 mm の雨量増加は 55 mm (= 82 億  $m^3$ )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  $m^3$ )と比べても小さいことが分かった。すなわちチャオブラヤ川流域において一雨季の降水量が 200 mm 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。

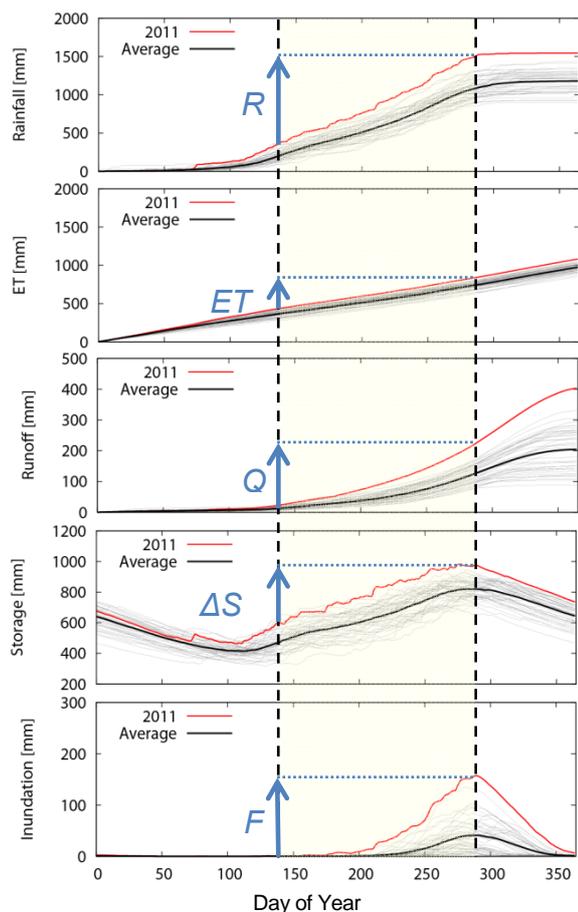


図-9. 流域全体の降水量・蒸発散量・流出量・流域貯水量・氾濫量（1月1日を起点として、各年を灰色線、平年値を黒色線、2011年を赤色線で表示。）

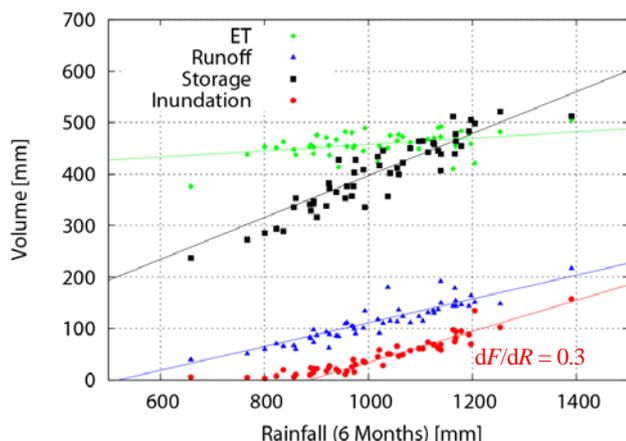


図-10. 各年6か月降水量と同期間の蒸発散量・土壤水分変化・流出量・氾濫量（ダムなしのケース）

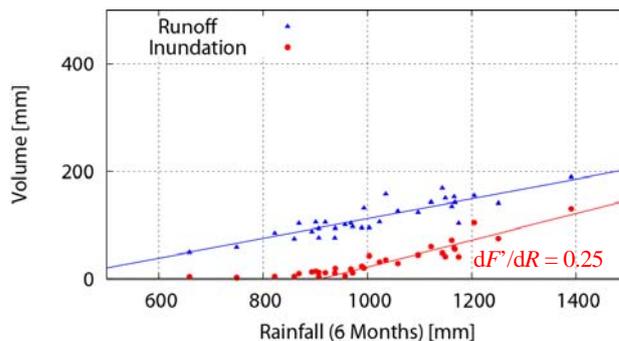


図-11. 各年6か月降水量と氾濫量（ダムありのケース）

#### 4. まとめ

本研究は、発展途上国における降雨の時空間分布を予測・把握し、その情報をもとに降雨流出から洪水氾濫までを流域一体で予測することを目標としている。

本年度は、領域モデル WRF とアンサンブルカルマンフィルタ LEKTF を用いて領域アンサンブル予測を行い、2011 年台風第 12 号および第 15 号による関西地域の降水予測を行った。得られた予報雨量を RRI モデルに与え、京都府日吉ダム流域を対象に流出計算を行った。6 時間毎に更新される 6 時間先の流出予測は、両事例ともにアンサンブル予測が決定論的予測を上回る精度となった。さらに、33 時間先までの予測については、台風第 15 号の場合は予測時刻によらず安定した高精度の予測が得られ、決定論的予測を改善することができた。一方、台風第 12 号の場合は精度が悪く、予測流量カーブも安定しなかった。今回のアンサンブル洪水予測システムは、条件次第では未来の流量を知る上で有用な情報を提供できると考えられる。

RRI モデルの開発と応用については、タイ・チャオプラヤ川流域に RRI モデルを適用し、長期連続の流出氾濫解析を実行した。2011 年のタイ洪水は約 1,400 mm の降雨によってもたらされており、過去の洪水に比べると 6 か月の降雨量が約 200 mm 多い。水収支解析の結果は 200 mm の降雨量増加のうち約 30%（ダムがある場合は約 25%）は氾濫量増加に結び付くことを示唆しており、この氾濫量増加はシリキットダムの総貯水量にも匹敵することが分かった。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 200 mm 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。

## 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) 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.
- 7) 気象庁：災害時気象速報, 平成23年台風第12号による8月30日から9月5日にかけての大雨と防風, [http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji\\_2011.html](http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_2011.html)
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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/HRL.6.41.

## STUDY ON FLOOD PREDICTION APPLICABLE TO FLASDH FLOODS

**Budgeted** : 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 for improving weather prediction and quantify its reliability. The hind-cast of typhoon events with 6hr and 33hr lead time and their application to the RRI model indicated the advantage of ensemble predictions over the deterministic one for reservoir inflow predictions. In terms of the RRI Model development and application, a 52-year long-term rainfall-runoff-inundation simulation was carried out in the Chao Phraya River basin. The water balance analysis based on the simulation results quantified the sensitivity of flood inundation volume to rainfall amount in a rainy season.

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