

# 2011年台風12号・15号を対象としたアンサンブル降雨流出予測実験

ENSEMBLE PREDICTION OF RAINFALL AND STREAMFLOW IN TYPHOON  
201112 AND 201115

牛山朋来<sup>1</sup>・佐山敬洋<sup>2</sup>・岩見洋一<sup>3</sup>・三好建正<sup>4</sup>

Tomoki USHIYAMA, Takahiro SAYAMA, Yoichi IWAMI, and Takemasa MIYOSHI

<sup>1</sup>正会員 博士(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)

<sup>2</sup>正会員 博士(工学) 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)

<sup>3</sup>正会員 修士(工学) 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)

<sup>4</sup>非会員 Ph.D. 理化学研究所計算科学研究機構 (〒650-0047 兵庫県神戸市中央区港島南町7-1-26)

We examine the feasibility of ensemble streamflow prediction utilizing forecast rainfall by regional ensemble prediction system by Weather Research and Forecasting (WRF) model and ensemble Kalman filter. The target area is the Hiyoshi Dam catchment in Kyoto Pref., and the target events are typhoon TALAS (201112) and ROKE (201115). The WRF model with 3 km horizontal interval was run by initial and boundary condition made up with Japan Meteorological Agency-Mesoscale Model (JMA-MSM). The predicted rainfall was given to a distributed hydrological model, Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) model. The ensemble streamflow predictions in their forecast lead time up to 6 hours improved those of deterministic forecasts in both typhoon events. On the other hand, forecast experiments up to 33 hours predicted reliable discharge in ROKE case, but not in TALAS case. In ROKE case, ensemble streamflow forecasts improved deterministic forecasts, and showed future discharge in fairly good accuracy independent from forecast initial time. In TALAS case, the forecasts were unstable depend on initial time. In case of stable ensemble streamflow forecasts are obtained such as in ROKE case, the ensemble streamflow forecasts could be useful for operational decision making.

**Key Words :** Numerical weather prediction, Ensemble prediction, Ensemble Kalman filter, LETKF, WRF, QPF, Typhoon201112, Typhoon201115, Hiyoshi Dam

## 1. はじめに

台風や前線の通過などによって大量の降水が予想される場合、数値天気予報による予測降水量を用いた河川流出予測を行うことにより、より長い期間にわたる洪水予測や河川の危機管理が可能になる<sup>1,2)</sup>。また、リードタイムを確保することによって、より早い段階で避難準備や適応策を実施することができる。同様に、ダム管理についても今後数日間の降水量を考慮することにより、効率的なダム操作が可能となる<sup>3)</sup>。このように、予測降水量は、河川管理やダム管理に有効である。

しかしながら、我が国においては数値天気予報による予測降水量は河川管理には現在のところ用いられていない<sup>4)</sup>。流出予測計算に用いられるのは、基本的に観測降水量であり、場合によって気象庁降水短時間予報、つま

り外挿手法を基本とした6時間先までの予測降水量が用いられるのみである。予測降水量が時として用いられない一番の原因は、数値天気予報による降水量の予測精度が不十分であることである。日本国内は一般に河川流域が小さいため、それに対応する狭い地域の降水量を定量的に予測するのは難しい。従って、精度に不安の残る予測降水量を用いるよりは、観測雨量をそのまま継続すると仮定して入力することが河川管理者としては通常の見解と言える。

近年数値天気予報技術の発展により降水量予測精度が向上している。これは、計算機速度の向上の他、データ同化やアンサンブル予報といった技術の進歩によるところが大きい<sup>1,2)</sup>。ここで、アンサンブル予報とは、初期値を少しずつ変えた複数の予報計算を同時並行で行うことにより、天気予報の不確実性を含めた確率的な予報を行う手法である。アンサンブル予報では、同時に複数の

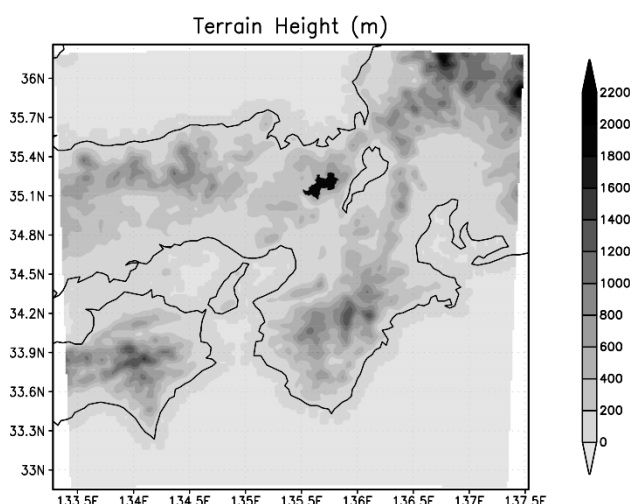


図-1. モデル計算領域。影は標高(m)を表わす。琵琶湖の西の黒い影が日吉ダム流域を示す。

予報計算を行うため、解像度は犠牲になるが、結果として予報精度は上がることが知られている<sup>12)</sup>。欧米では、このようなアンサンブル予報による降水量が現業の洪水予測に利用されている。例えば、ドナウ川などの国際河川を持つドイツなど7カ国では、COSMO-LEPS (Consortium for Small-Scale Modeling-The Limited Area Ensemble Prediction System)<sup>1)</sup>と呼ばれるコンソーシアムを通じて予報データを融通し合い、洪水予測を行っている。ここでは、欧州の中期天気予報センターECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts)の全球アンサンブル予報を、7kmメッシュにダウンスケーリングした5.5日先までの領域アンサンブル予報を用いて河川流出計算を行っている。また、スイスのような複雑な地形を持つ地域でも、COSMO-LEPSを利用した洪水予報の研究が進められている<sup>9)</sup>。このような状況の中で、我が国では数値気象予報を用いた洪水予測研究はまだ数える程しかない<sup>6,7)</sup>。

本研究では、領域アンサンブル予報を用いた河川流出予測の可能性を調べるため、この手法を台風の事例に適用した結果を紹介する。前回の報告に引き続き、今回は6時間先と33時間先の予報結果について示し、また予報開始時刻により予報精度が変わる様子を含めて紹介する。

## 2. 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種である、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>8,9)</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1

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                      |

種であり、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>9)</sup>。

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、さらに予測流量を観測値と比較することにより、予測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時間毎瞬間値である。データ数は6時間あたり東西風・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日間スピニング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

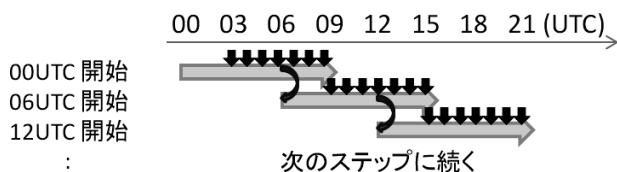


図-2. LETKFの計算進行の概念図. Miyoshi and Kunii (2011)<sup>9)</sup>より入手.

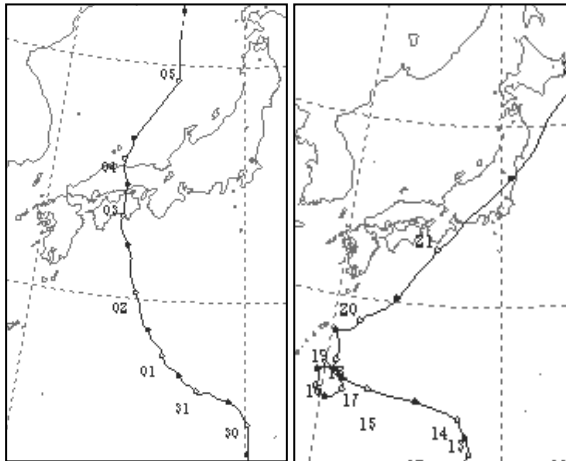


図-3. 台風第12号(左)と台風第15号(右)の気象庁ベストトラック. 数字は日付を表わし、白丸は00UTC、黒丸は12UTCの位置.  
[http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/route\\_map/bst\\_v2011.html](http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/route_map/bst_v2011.html)より入手.

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>10)</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 (Rainfall-Runoff-Inundation)モデルと呼ばれる分布型降雨流出・氾濫モデルである<sup>11)</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.

### 3. 台風第12号と台風第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<sup>12)</sup>.

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1,000mm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794mmに達した. しかし、本州南岸に近づいた21日以降は比較的高速で進み、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<sup>12)</sup>、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.

### 4. 結果

#### (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

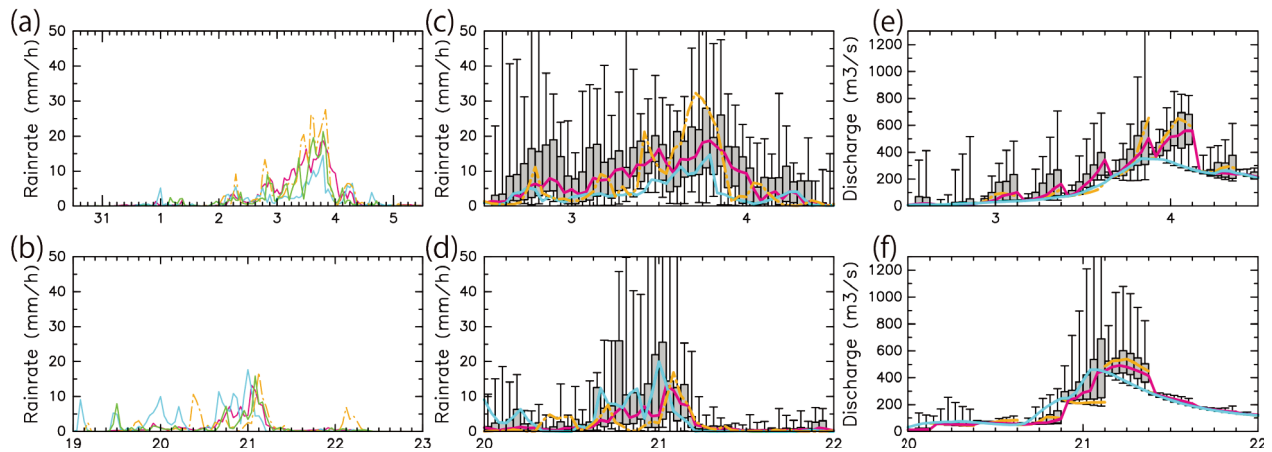


図-4. 台風第12号(a)と台風第15号(b)による雨量の時系列(ハイトグラフ)(mm/h)。各線は、決定論的予報(オレンジ)、MSMオリジナル(緑)、アンサンブルメディアン(紫)、レーダー観測(水色)である。なお予報値は6時間予報値である。横軸の数字は日付(UTC)を表す。(c)、(d)は同様にアンサンブル予報の情報を含めた雨量の時系列(ハイトグラフ)である。影をつけたボックスが25%~75%の分布、縦棒はすべてのアンサンブルメンバーの範囲、ピンク折れ線はアンサンブルメディアン、オレンジと水色は(a)、(b)と同じく決定論的予報とレーダー観測値である。(e)、(f)は流量予測値(ハイドログ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

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雨量を元にした流量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、また観測値を予測したアンサンブルメンバーが少なくとも一つは存在する。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流量予測の範囲を示すことができた。

## (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

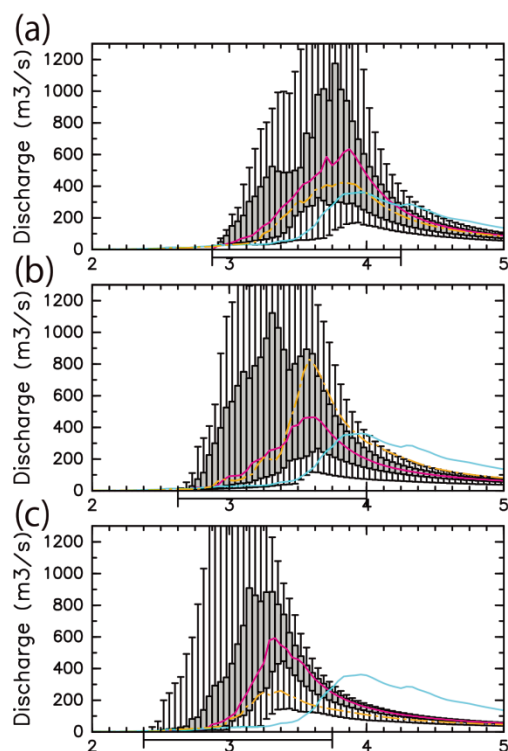


図-5. 台風第12号の33時間アンサンブル流量予測ハイドログラフ。影をつけたボックスはアンサンブル予測の25%~75%分位、縦の棒はすべてのアンサンブルメンバーの範囲、紫はアンサンブルメディアン、オレンジは決定論的予測値、水色はレーダー観測から求めた流量である。横軸下の横線は、用いた予報雨量の予報期間を表す。(a)は9月2日21時からの33時間予測、(b)は9月2日15時からの33時間予測、(c)は9月2日9時からの予測である。

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の予報が台風の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、観測流量はほぼ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、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時間予測では、予測精度

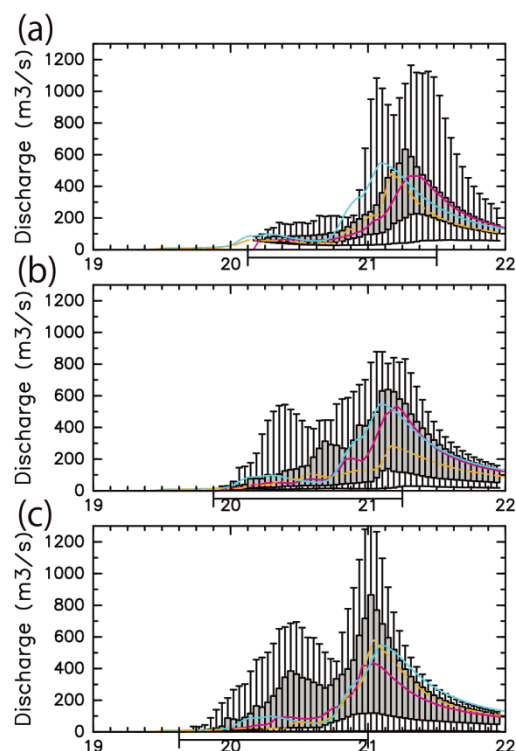


図-6. 台風第15号の33時間アンサンブル流量予測ハイドログラフ。凡例は図-7と同様。(a)は9月20日3時からの33時間予測、(b)は9月19日21時からの33時間予測、(c)は9月19日15時からの予測である。

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。しかしながら、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。

## 5. 議論

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洪水予報に活用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



が低いと判断できる。一方、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る場合は、降雨予報精度が安定しており、予測の信頼性がより高いことが示唆される。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可能性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。

## 6. 結論

領域モデルWRFとアンサンブルカルマンフィルタLETKFを用いて領域アンサンブル予報を行い、2011年台風第12号および第15号による関西地域の降水予報を行った。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は決定論的予測を上回る精度が得られた。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。結果として、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。

**謝辞：**本研究はJSPS科研費24560632の助成を受けたものである。気象庁のMSM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。

## 参考文献

- 1) Cloke, H. L., and F. Pappenberger: Ensemble flood forecasting: A review. *J. Hydrol.*, 375, pp.613-626, 2009.
- 2) Cuo, L., T. C. Pagano, and Q. J. Wang: A review of quantitative precipitation forecasts and their use in short- to medium-range streamflow forecasting. *J. Hydrometeorol.* 12, pp.713-728, 2011.
- 3) 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.
- 4) 吉谷純一: 洪水・低水管理のための降雨予測技術発展の展望, *天気*, Vol.54.7, pp. 45-48, 2007.
- 5) Alfieri, L., J. Thielen, and F. Pappenberger: Ensemble hydro-meteorological simulation for flash flood early detection in southern Switzerland, *J. Hydrology*, 424-425, pp. 143-153, 2012.
- 6) 牛山朋来, 佐山敬洋, 藤岡奨, 建部祐哉, 深見和彦, 三好建正: アンサンブルカルマンフィルターを用いた2011年台風12号・15号の降雨流出予測実験, *河川技術論文集*, 第18巻, pp.319-324, 2013.
- 7) Yu, W., E. Nakakita, and K. Yamaguchi: Assessment of probabilistic flood forecasting using ensemble NWP rainfall with 30hr forecast time during typhoon events, *Advances in River Engineering*, 19, pp. 235-240, 2013.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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) (2014.4.3受付)