

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

ENSEMBLE PREDICTION OF RAINFALL AND STREAMFLOW IN TYPHOON 201112 AND 201115 BY ENSEMBLE KALMAN FILTER

牛山朋来¹・佐山敬洋²・藤岡奨³・建部祐哉⁴・深見和彦⁵・三好建正⁶
Tomoki USHIYAMA, Takahiro SAYAMA, Susumu FUJIOKA, Yuya TATEBE, Kazuhiko FUKAMI, and Takemasa MIYOSHI

¹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)

²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)

³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)

⁴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)

⁵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)

⁶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)

Recent advances of regional ensemble weather predictions have increasingly improved predictability of rainfall useful for streamflow forecasts. However, it was not employed yet in Japan. In this study regional ensemble prediction of rainfall by typhoon TALAS (201112) and ROKE (201115) in Kansai area was conducted using an ensemble Kalman filter and regional model, WRF (Weather Research and Forecasting). The predicted rainfall was given to a distributed hydrological model to implement ensemble streamflow forecasts. The ensemble rainfall predictions were not capable to predict point rainfall, but reasonably predicted average rainfall of severe rainfall area in Kii Pen. On the other hand, for Hiyoshi dam catchment, another study area in Hyogo Pref., the results of ensemble predictions were separated; for ROKE case it was quite successful, but for TALAS case it overestimated rainfall significantly. The resulted streamflow forecasts reflected the rainfall predictions. However, the streamflow forecasts utilizing combination of radar observed rainfall and predicted rainfall are quite encouraging for possible use of regional ensemble prediction for streamflow forecasts in Japan.

Key Words : Numerical weather prediction, Ensemble prediction, Ensemble Kalman filter, LETKF, WRF, QPF, Typhoon201112, Typhoon201115, Kii Peninsula

1. はじめに

台風などの大量の降水が予想される場合、より長期間の降雨・流出予測を行うことが切望されている。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、洪水予測への利用にも期待が高まっている。総観規模の数値予報については、気象庁では15年程前からアンサンブル予報を採用し、予報の不確実性を考慮することにより全体として予報精度を高めている。一方、局地的な現象の予報は現在でも困難である。局地現象の予報計算のためには高解像度の予報モデルが必要となるが、モデルの解像度の3乗に比例して計算量が増え、それに対応する空間的に密な観測データの同化も必要である。また、

局地予報のための領域アンサンブル予報はさらに多くの計算機資源が必要となるため、我が国では現在のところ行われていない。しかし、近年のスーパーコンピュータの能力の発展により、近い将来領域アンサンブル予報が行われる可能性も現実のものとなっている。また、欧米諸国では、流域面積の違いはあるものの、領域アンサンブル予報を用いた洪水予測が既に行われている^{1,2)}。このような、予報降水量を用いた洪水予測技術を開発し、日本国内で多発する洪水に対して早期警戒を行うことは、避難計画や被害対策に対して重要である。また、予報降水量をダムの放水操作に積極的に取り入れることも考えられる³⁾。本研究は、領域アンサンブル予報を行ってその雨量を流出モデルに適用し、日本の小流域に対する流出予測の可能性について議論する。

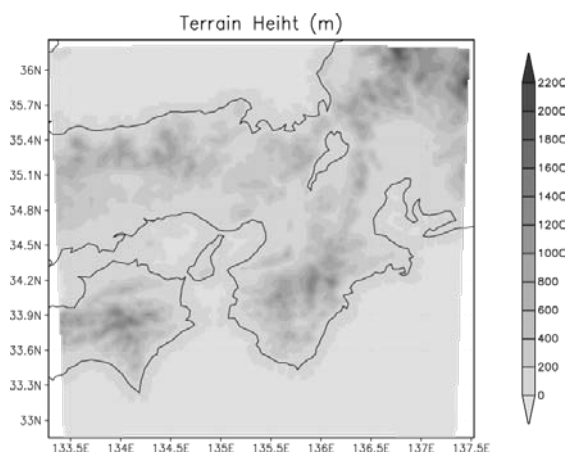


図-1. モデル計算領域。影は標高 (m) を表わす。

2. 方法

本研究では、一般的なワークステーションでも計算を可能にするため、領域を限定した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を用いた。これは、データ同化とアンサンブル予報を結合させた手法であり、同時に両方の目的が達せられる。得られた予測雨量は流出モデルに導入し、信頼性情報を加味した洪水管理等に役立てることを目的としている。

解析対象として、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号を用いた。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、予測の精度や有効性について議論を行う。

カルマンフィルタは、モデル内の予報誤差と観測誤差から適切な重みを求め、予報値と観測値から解析値を推定することを目的としたデータ同化手法である。大気力学系では予報誤差の情報が膨大過ぎるため計算機で解くことができない。そこで、アンサンブルカルマンフィルタでは、限られたメンバー数によるアンサンブル予報から予報誤差の情報を推定することにより、カルマンフィルタを適用する。本研究で用いたアンサンブルカルマンフィルタは、三好らによって開発された局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(Local Ensemble Transform Kalman Filter; LETKF)^{4,5)}である。この手法は、アンサンブルカルマンフィルタを並列計算に適した構造に改変し、さらに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の最新の機能を持つ。

また、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。同化したデータは、米国NCEP (National Centers for Environmental Prediction)で保存されている(PREPBUFRと呼ばれる)1時間毎の地上海上

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～4 日 9 時
計算時間 2	2011 年 9 月 20 日 0 時～21 日 9 時
初期, 境界条件	気象庁 MSM, 1 部 NCEP gfs4 を流用
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

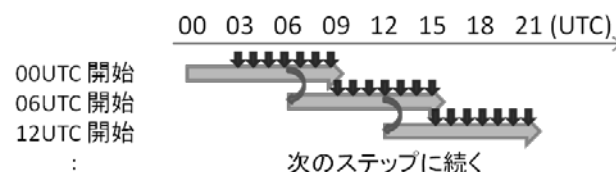


図-2. LETKFの計算進行の概念図

観測(風, 気温, 気圧), ラジオゾンデ(風, 気温, 比湿), 衛星追尾風(風), および気象台測候所32か所(風, 気温)の1時間毎瞬間値である。データ数は6時間分で東西風・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自由に取得することができる。

計算領域として、図-1のように紀伊半島南海上を含む375km四方の領域を設定した。格子間隔は3kmである。計算設定は、気象庁領域予報モデルMSM (計算格子間隔5km)を境界条件とする一重の計算領域とした。アンサンブルスプレッドを維持するため、別に計算した15km格子モデルによるアンサンブル予報から求めた摂動を側面境界に3時間毎に加えた。その他のモデル設定を表-1に示す。なお、50hPa面や土壌水分などのMSMに含まれていない情報をNCEP gfs4 (global forecast system version 4)から流用した。

次に、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、メンバー数は21とした。WRFによる9時間予報が終了した後、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。従って今回の予報実験は、一続きの予報ではなく、6時間毎の予報・解析サイクルの各時点における予報値を集めた最善の結果である。予報リードタイムは各サイクルで最大9時間であるが、将来長時間予報が必要となった場合には、各サイクルの解析値から長時間積分を行うことで長時間予報を行うことができる。

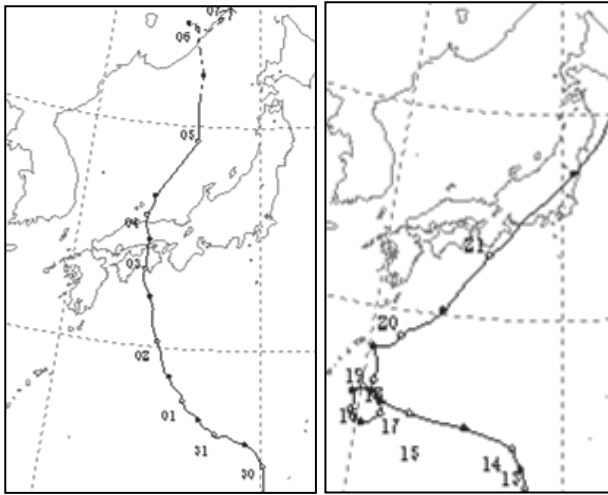


図-3. 台風第12号(左)と台風第15号(右)の気象庁ベストトラック。数字は日付を表わし、白丸は00UTC、黒丸は12UTCの位置。

また、一番最初の時刻（図-2では00時）の初期値は、別の方法で用意する。この時点の初期値は、それぞれ適当なスプレッド（アンサンブルメンバーばらつき）持ち、それらがLETKF処理を繰り返すことにより適切なスプレッドを持つアンサンブル予報値となる。最初の初期値は、適当なスプレッドを持ち、しかも計算不安定が起こらないものである必要がある。そこで、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日間スピニングアップを行った予報値を初期値として用いた。

なお、アンサンブル予報の効果を検証するため、アンサンブルを用い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雨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320km²)である。用いたモデルは、京都大学で開発されたセル分布型モデルである⁹⁾。これを、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時間先までの予報雨量と、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雨量情報を使って、6時間毎に流出予測を繰り返す、という方法を採用した。なお、決定論的予報については、すべて予報雨量を用いて流出計算を行った。

3. 台風第12号と台風第15号の特徴

台風201112号と201115号は、ともに関西付近を通過した(図-3)。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た、

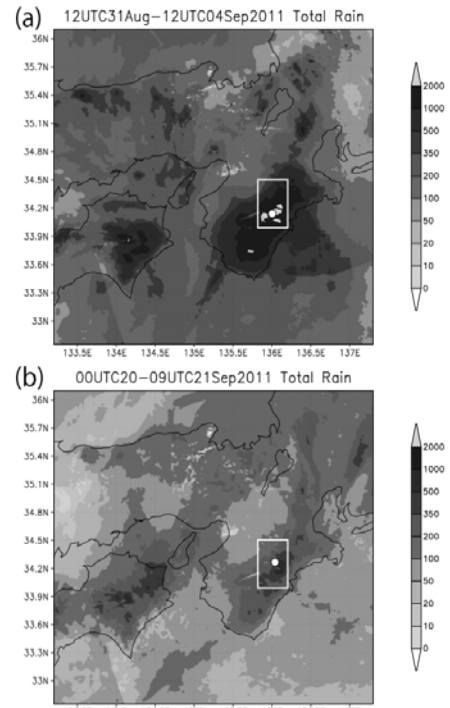


図-4. 国交省Cバンドレーダによる台風第12号(a)と台風第15号(b)に伴う解析期間総降水量(mm)。図中の四角は領域平均を行った範囲で、その中の白丸は(a)上北山と(b)宮川のアメダス地点。

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1812mmと、9月の月間降水量の4倍以上となった(図-4)。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⁷⁾。

また、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1000mm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日以降は比較的速度い速度で進み、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⁷⁾、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だと言える。

4. 結果

最初に数値予報による積算降水量分布を図-5に示す。図-5aの台風第12号雨量のアンサンブル平均は、図-4aの

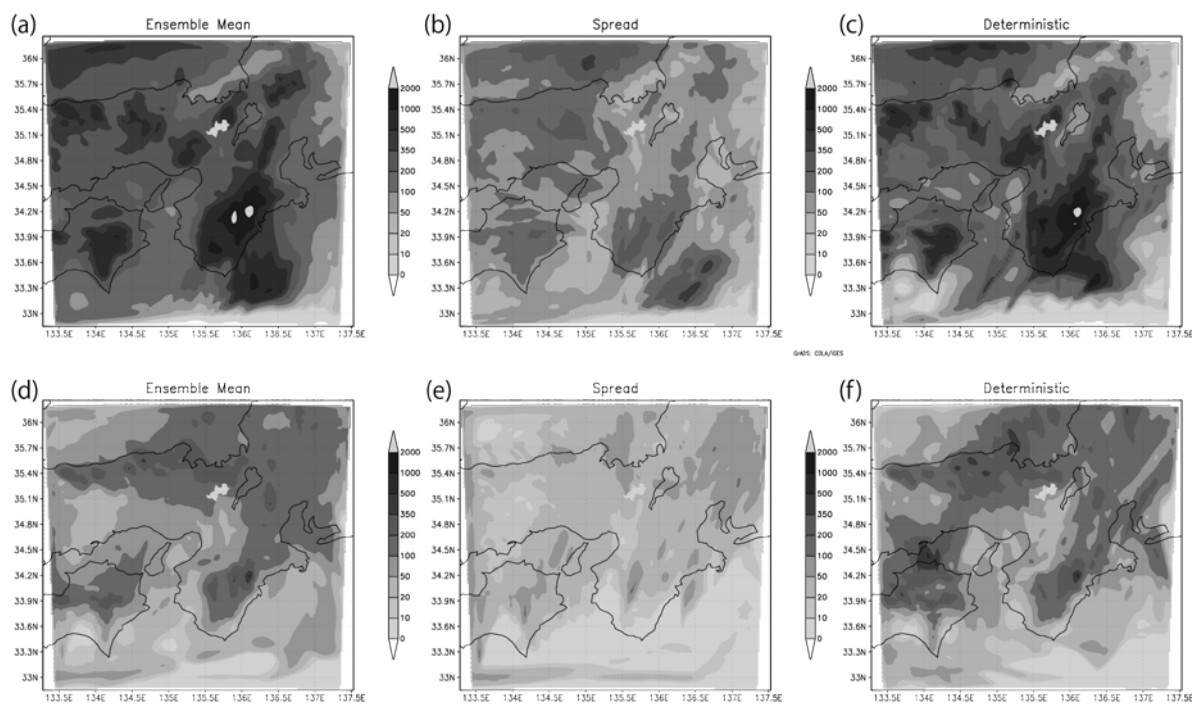


図-5. 予測雨量のアンサンブル平均(a), (d), アンサンブルスプレッド(b), (e), および決定論的予報(c), (f)の分布. 上段が台風第12号, 下段が台風第15号のものである. 琵琶湖の西側の薄い色のひょうたん型領域は日吉ダム流域である.

観測値と比較すると、紀伊半島から鈴鹿山脈にかけての降水域は、分布・量ともによく一致していた。しかし、琵琶湖の西側に位置する日吉ダム流域ではやや多めの予報値となった。また、日本海から鳥取県にかけての降水量が過大評価となっていた。四国東部の降水域は、分布は良く再現したが、やや過小評価していた。一方、観測には現れていた淡路島周辺の降水が予報されなかったのに対し、兵庫県東部には観測に無い雨域が現れた。これらの特徴は、決定論的予報(図-5c)でもほぼ同じように現れていた。アンサンブル平均と決定論的予報の違いは、鳥取県から日本海および琵琶湖北東方(伊吹山地)の雨域でアンサンブル予報の方が過大評価傾向が大きかった点である。アンサンブルスプレッドは紀伊半島南東沖や日本海で大きく、観測データの少ない領域で大きくなったものと考えられる。

次に、台風第15号の事例については、図-5dのアンサンブル平均は、紀伊半島の降水量をやや過小評価していたが、日吉ダム流域では観測に近い値を予報していた。若狭湾から兵庫県沿岸にかけては過大評価となった。一方観測では強かった四国東部から淡路島にかけての降水域が非常に弱かった。図-5fの決定論的予報では、アンサンブル平均と良く似た雨量分布を示したが、大阪府の雨量が大幅に過小評価になったり、四国北部の高松と若狭湾西部で過大雨量を示すなどの違いがあった。アンサンブルスプレッドは、台風第12号の場合と比べて小さかった。

予報積算雨量の水平分布についてまとめると、台風第12号については予報は過大傾向、台風第15号については

過小傾向であった。また、台風第12号についてはアンサンブル平均と決定論的予報には大きな違いはなかったが、台風第15号についてはアンサンブル平均が降水域の再現のいくつかの点で勝っていたと言える。

次に、図-6に2つの台風について最大地上降水量を観測したアメダス地点の降水量と、アンサンブル予報および決定論的予報による予測雨量を示す。図-6aの台風第12号の事例では、8月31日には雨が降り始めており、9月2日と3日は30mm/h前後の雨が終始降り続いていた。予測時間雨量は、いずれの場合も1日15時まで過小評価していたが、1日21時から3日15時まで観測降雨を良く表現した。しかし、3日15時から4日0時まで予報雨量は観測を大幅に過大評価していた。

図-6bの台風第15号の場合も予報降水量は観測変動を良く表わしていたが、終始過小評価となった。また、この場合ではアンサンブル予報は決定論的予報よりも過小評価傾向が大きかった。以上のことから、地点予報値については、アンサンブル予報・決定論的予報ともに雨の変動を表現できていたものの、十分な精度があるとは言えなかった。

次に、図-7に、図-4で示した領域平均雨量の国交省Cバンドレーダ観測値と予報値を示す。領域の大きさは約30km×60kmである。領域平均雨量に関しても予測雨量は観測雨量変動をよく再現していた。また、地点雨量の予測に比べて領域平均雨量予測は観測値に近く、予測精度が高かった。例えば、図-7aの台風第12号の場合、3日前半までの予測雨量は観測雨量に対する追従性が良く、3日後半の過大評価傾向も小さかった。図-7bの台風第15

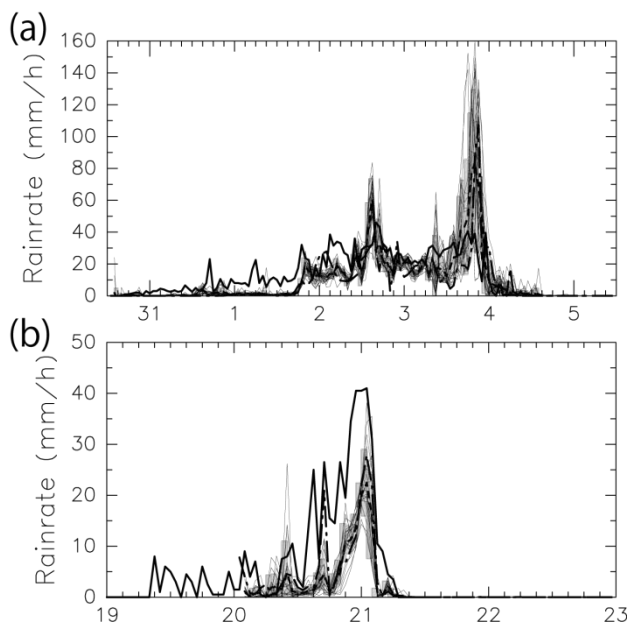


図-6. アメダス奈良県上北山(a)および三重県宮川観測点(b)における1時間雨量。アメダス観測値(太実線), アンサンブル平均(太破線), 決定論的予報(太一点鎖線), 各アンサンブルメンバー(細実線)。灰色領域はアンサンブル平均±スプレッド。
(a) 台風第12号, (b) 台風第15号。

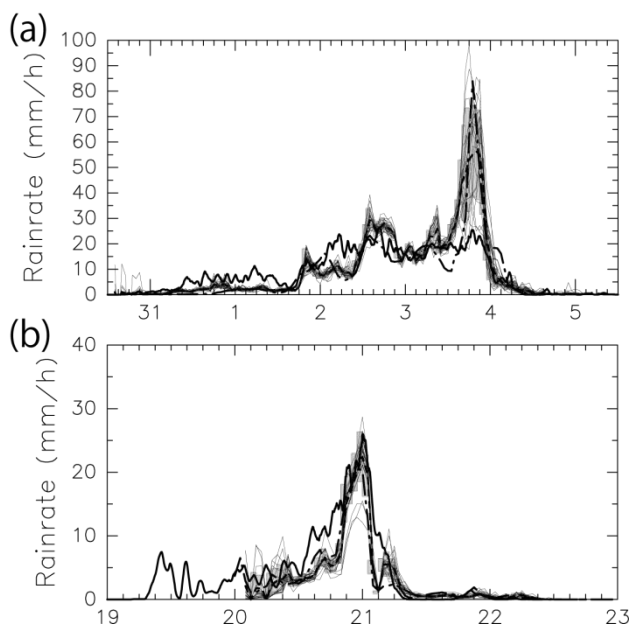


図-7. 紀伊半島南部山地の領域平均平均降水強度。国交省Cバンドレーダ(太実線), アンサンブル予報平均(太破線), 決定論的予報(太一点鎖線), 各アンサンブルメンバー(細実線)。
(a) 台風第12号, (b) 台風第15号。

号の場合も、地点雨量の場合に比べて予報値は観測値により近かった。このように、地点雨量に対しては雨量予測は困難であるものの、領域平均雨量では比較的高い精度で予測できることが示唆された。

続いて図-8に、日吉ダム流域の積算雨量変動を示す。この流域では、台風第12号、15号ともにアンサンブル予

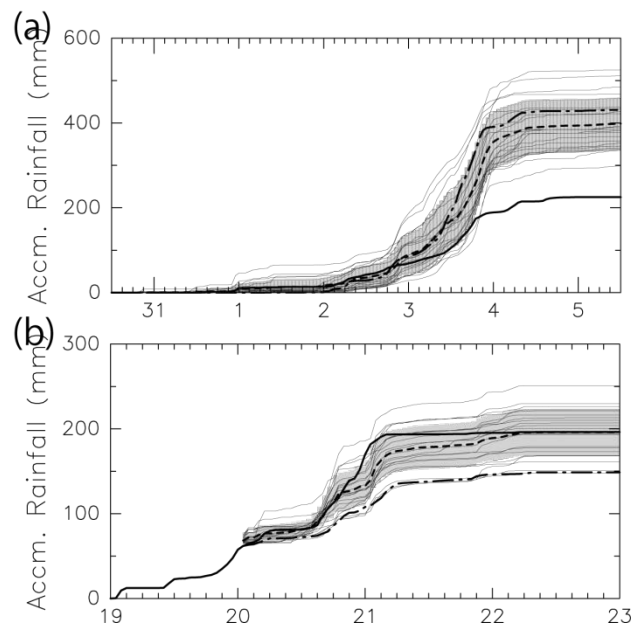


図-8. 日吉ダム流域の積算雨量。国交省Cバンドレーダ(太実線), アンサンブル平均(太破線), 決定論的予報(太一点鎖線), 各アンサンブルメンバー(細実線)。(a) 台風第12号, (b) 台風第15号。棒グラフと赤実線は観測による降水強度と積算雨量で、水色の線が予測時間雨量と積算雨量。

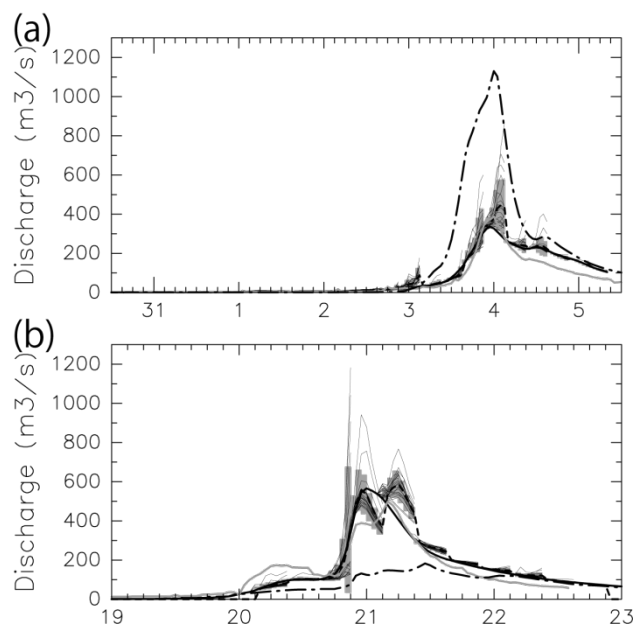


図-9. 日吉ダム流域流量。国交省Cバンドレーダ(太実線), アンサンブル予報平均(太破線), 決定論的予報(太一点鎖線), 各アンサンブルメンバー(細実線), 観測流量(太灰色実線)。(a) 台風第12号, (b) 台風第15号。

報の精度が決定論的予報を上回っていた。特に台風第15号の場合、25%程度過小評価していた決定論的予報に対して、アンサンブル予報は観測とほぼ同じ積算雨量を予報した。しかしながら、台風第12号の場合はアンサンブル予報・決定論的予報ともに2倍近い過大評価となった。これは、図-5に示したように、ちょうどこの地域が予報

精度の悪い部分に位置していたことを反映している。

続いて図-9に、これらの予報およびレーダー観測による雨量分布を用いて流出計算を行った結果を示す。台風第12号の例では、それまで無降雨期間が長かったため、2日の降雨開始から流出が増えるまでタイムラグがあり、総降水量に対する流出量も小さ目であった。台風第15号の例ではこの直前の9月16、17日にも降水があったため、流出量は多めとなった。

予報流出量は、台風第12号の例では予報雨量が過大であったためアンサンブル流量予測も過大傾向となり、特に3日後半から4日前半にかけて過大となった。また、すべて予報雨量を用いた決定論的予報による流量予測も観測の3倍にも達した。しかし、4日以降はアンサンブル降水予報は観測に近く、また予報は雨の終息を正しく予測できていたため、4日3時以降はアンサンブル予測流量がレーダーから求めた流量付近に散らばるという理想的な予報結果となった。

台風第15号の例ではアンサンブル流量予測は観測に近いものであった。流量の極大の21日0時付近ではアンサンブル流量予測はやや過小評価傾向にあり、その次の21日3時から9時については過大評価傾向にあった。これらのずれは、図-8bに現れているように、22日21時頃に観測された強い降雨が予報では4時間程度遅れて予報されたためと考えられる。しかし、アンサンブル流出予測は、レーダー観測による流出変動を概ね予測できていた。さらに、アンサンブル予報は決定論的予報の大幅な過小評価傾向を修正することができた。

5. 議論

これまで示してきた領域アンサンブル予報は、予報対象領域の場所や大きさにより精度がまちまちであり、雨の予報精度については課題が残った。しかしながら、予報雨量とレーダー観測雨量を組み合わせ用いた流出予測は、未来の流量変動を知る上で有用な情報だと考えられた。このような情報があれば、数時間先までの流量変動について、変動幅も合わせて予測することが可能となる。

今回の領域アンサンブル予報では、一般的なワークステーションでも計算を可能にするため、計算領域を限定して実験を行った。そのため、側面境界の影響をより敏感に受けたと考えられる。当初、側面境界摂動を導入しない予報実験を行った時には、時間とともにすべてのアンサンブルが同じ結果に収束し、アンサンブルスプレッドがゼロに近くなった。今回側面境界に摂動を導入した結果、アンサンブルスプレッドは維持され、データ同化の効果を持続させることができた。しかし、側面境界摂動の性質は結果に大きく影響する要素なので、今後も調査が必要である。

その他予報結果に影響する要素として、モデル解像度、モデル領域の大きさ、同化データの種類や密度等があげられる。これらの要素を向上させることで、予報精度を改善することが期待できる。その反面、計算機資源と予報精度の折り合いも考慮すべきである。今後これらの要素について数多くの検証を行う必要がある。

6. 結論

WRF-LETKFを用いてアンサンブル予報を行い、台風201112号および201115号による紀伊半島の降水の再現を試みた。最大降水量を記録した地点雨量については予測降水量は信頼性が低かったものの、最大降水地点を含む領域平均予測雨量は精度が向上した。しかし、流出計算の対象である日吉ダム流域に対しては、台風第15号の場合に理想的な予報結果が得られたものの、台風第12号の事例では大幅に過大評価となった。これらの雨量を用いたアンサンブル流出予測は、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が、さらに多くの改善が必要である。

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) 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) 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.
- 6) 児島利治, 宝 馨, 岡 太郎, 千歳知礼: ラスター型空間情報の分解能が洪水流出解析結果に及ぼす影響, *水工学論文集*, 第42巻, pp. 157-162.
- 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

(2013.4.4受付)