

2011年台風12号・15号により日吉ダム流域で発生した洪水のアンサンブル降雨流出予測実験

牛山朋來・佐山敬洋・岩見洋一

1. はじめに

近年、台風や集中豪雨により、洪水災害が多発している。その中には、避難の遅れから人的被害が発生した事例もみられる。災害を引き起こす豪雨をあらかじめ予測して流出計算を行い、早い段階で洪水の発生を予測することができれば、人的社会的被害を軽減することができる¹⁾。

しかし、このような豪雨の予報は、これまで非常に困難だと考えられてきた。気象庁の天気予報モデルの解像度が不十分であったことや、そもそも天気図上に現れない集中豪雨のような小さな現象は予報が難しいためである。しかしながら、コンピュータの計算能力は年々向上し、予報技術の進歩も合わせて、天気予報の精度は徐々に上がっている。

そこで、本研究では、新しい天気予報技術を用いて、実際に災害を起こした台風の予報実験を行ない、洪水予測を行った。この結果を評価し、将来の洪水予測の改善につながる技術を報告する。なお、用語については各分野の通例に従い、水文学の分野である洪水予測については「予測」を用い、気象学の範囲である天気予報では「予報」を用いる。

2. 方法

2.1 アンサンブル予報の概要

現在の気象庁の天気予報は、まず地球全体の天気を予報する全球予報モデル (GSM) により、11日先までの天気予報を計算する。続いて、全球予報を境界条件として、メソモデル (MSM) を走らせ、39時間先までの予報を行う。さらにMSMを境界条件として局地モデル (LFM) を走らせ9時間先までの予報を行っている。水平解像度は、それぞれ20km・5km・2kmである。解像度が上がるほど地形や土地利用の表現が現実になりに、また雨を降らせる雲の対流を精度よく表現

できるため、降水予報精度は高くなる。しかしながら、水平解像度が2倍になると少なくとも計算時間は $2^3=8$ 倍に増えるため、計算解像度はコンピュータの計算能力に依存する。

また、現在の気象庁の天気予報は、全球予報を除いて決定論的予報、つまり単一の計算結果を用いている。しかしながら、天気の変化は非線形性が強く、不確実性が大きいいため、単一の予報計算に頼るのには限界がある。

この予報の不確実性に対処するのが、アンサンブル予報である。アンサンブル予報は、10~50個の複数の予報計算を、それぞれわずかに異なる初期値から開始し、複数の予報結果から不確実性を考慮する手法である。解像度を上げるため、領域を限定した領域アンサンブル予報により洪水予測を行う手法は、欧州ではすでに現業化されている²⁾が、日本ではまだ研究段階である。

2.2 数値天気予報モデルの設定

本研究ではこの領域アンサンブル予報を用いた予報実験を行う。予報システムとして、Weather Research and Forecasting - Local Ensemble Transform Kalman Filter (WRF-LETKF)^{2),3)}を用いる。WRFモデルは米国で開発され、現在世界で最も利用されている予報モデルの一つである。LETKFは、先進的なアンサンブルカルマンフィルターの一つである。アンサンブルカルマンフィルターは、アンサンブル情報から得られる予報誤差を考慮して観測データをモデルに取り入れる (データ同化) と同時に、各アンサンブルメンバーの適切な初期値を作ることができる手法である。

本研究では、台風による豪雨を予報するため、WRFモデルを低解像度の広い領域と、高解像度の狭い領域を重ねる方法によって計算した。これは、前回の報告⁵⁾が高解像度領域のみを用いて予報を行ったのに対する改善点である。計算領域は、図-1の通りである。解像度は15kmと3kmとした。境界条件は、気象庁のMSMを用いた。

LETKFを用いて同化した観測データは、米国

Ensemble Rainfall and Streamflow Prediction Experiment in Hiyoshi Dam Basin Caused by Typhoons Talas and Roke in 2011

*土木用語解説：アンサンブル予報

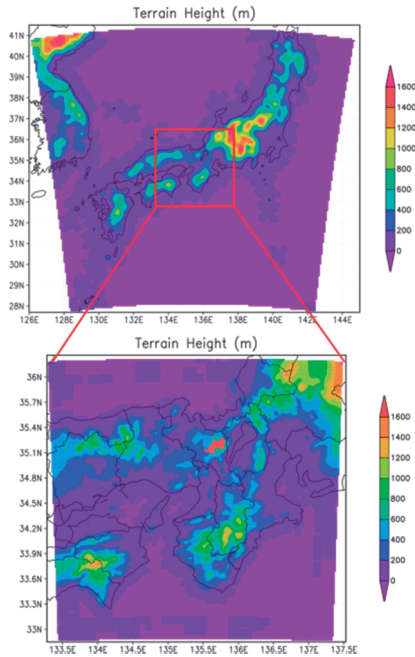


図-1 WRFモデルによる数値予報領域。色は標高を表す。下図のオレンジ色部分は、日吉ダム流域である。

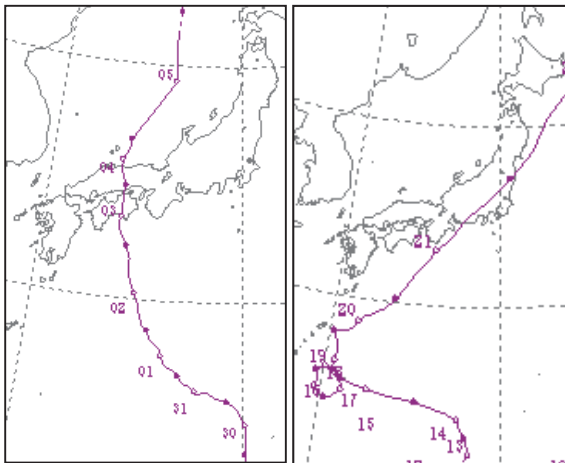


図-2 台風12号(左)と15号(右)の進行経路。気象庁ベストトラックによる。数字は日付を表す。

環境予報センター(NCEP)が収集している世界の地上観測・船舶観測・ラジオゾンデ・航空機観測・衛星追尾風・クイックスキャット等の一般気象観測データ(PREPBUFR)、気象庁アメダス、GPS可降水量の1時間観測値である。なお、今回のアンサンブルメンバー数は21個で行った。

WRF-LETKFによる解析を豪雨発生の日前10日前行かない、得られた初期値を用いて、3つの初期時刻から、33時間先までの降水予報を行った。

2.3 流出予測

2.2節で求めた降水予報を、降雨流出氾濫モデル(RRI)モデル⁴⁾に与えることにより、京都府にある日吉ダム流域の流出計算を行った。RRIモ

デルは、斜面部は2次元拡散波近似、河道部は1次元拡散波近似を用いており、浸透流も考慮する分布型モデルである。今回は、斜面部の格子間隔は200mである。国交省Cバンドレーダー雨量を用いて、あらかじめキャリブレーションを行った。日吉ダムの流域面積は、320km²である。

流出予測計算では、数値天気予報による予報降水量が得られる前の時間はRRIモデルにレーダー雨量を与え、予報期間よりも後は降水量ゼロを与えた。

2.4 台風12号と15号の特徴

今回予報対象としたのは、2011年9月に関西地域に大きな被害を出した台風12号・15号である⁵⁾。台風12号は、比較的進行速度が遅かったため、期間内に最大1800mmの降水をもたらした。紀伊半島を中心に洪水・土砂災害をもたらした。その約2週間後に、再び接近した台風15号は、紀伊半島に約800mmの豪雨をもたらした。図-2に、台風12号と15号の経路を示す。12号は、本州南海上から近づき、9月3日に四国中国地方をゆっくりと横断し、日本海に抜けた。15号は、九州南海上から北東進し、9月21日に紀伊半島をかすめ、東海から関東を縦断した。

3. 結果

図-3に、アンサンブル予報による予報降水量と、流出予測を示す。観測降水量は3日にピークを迎えているが(図-3abc)、これは3日に台風が最接近したことによる(図-2)。図-3abcのアンサンブル予報による降水量は、観測値と必ずしも一致しなかった。言い換えると、図-3abのアンサンブル中央値は観測降水量のピークの前半を捉えているものの、観測降水量のピーク後半については過小評価となった。また、予報リードタイムの長い図-3cでは、リードタイムが短い図-3abに比べて予報精度が低下した。しかし、いずれの場合もアンサンブル予報は観測降水量の変動範囲を含んでおり、極端降水の見逃しは起こらなかった。

続いて、図-3defは流出予測の結果である。3つの予測のいずれも、ピーク流量のアンサンブル中央値は、レーダー観測に基づく計算流量や観測流量とほぼ等しかった。しかし、ピーク流量の出現時刻を早めに予報した。これは、気象庁の台風進行速度の予報が実際よりも速かったため、本研究

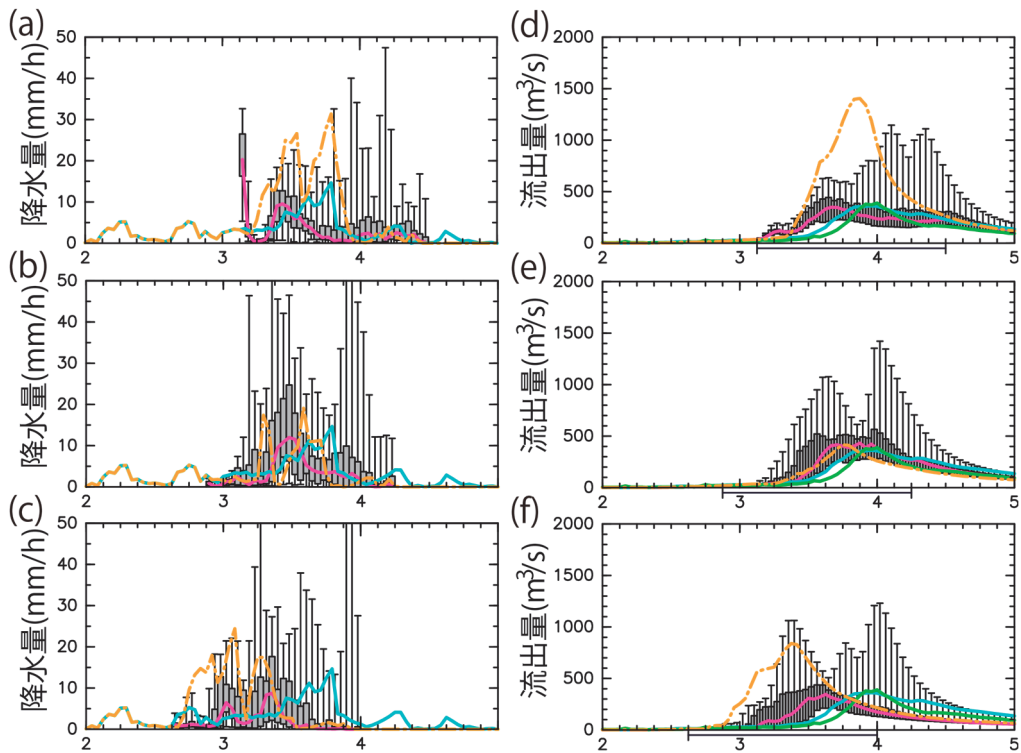


図-3 台風12号の日吉ダム流域内の降水予報および流出予測。(a)~(c)は予測降水量、(d)~(f)予測流出量。(a)(d)は3日3時から、(b)(e)は2日21時から、(c)(f)は2日15時からの予測。縦棒はアンサンブル予測の範囲、灰色領域はアンサンブルの25%~75%の範囲、紫色はアンサンブル中央値、水色はレーダー観測、オレンジ色は決定論的予測である。緑線は観測流量である。流出量の図の横軸の下線は、降水量の予報範囲を表す。時刻はUTC。

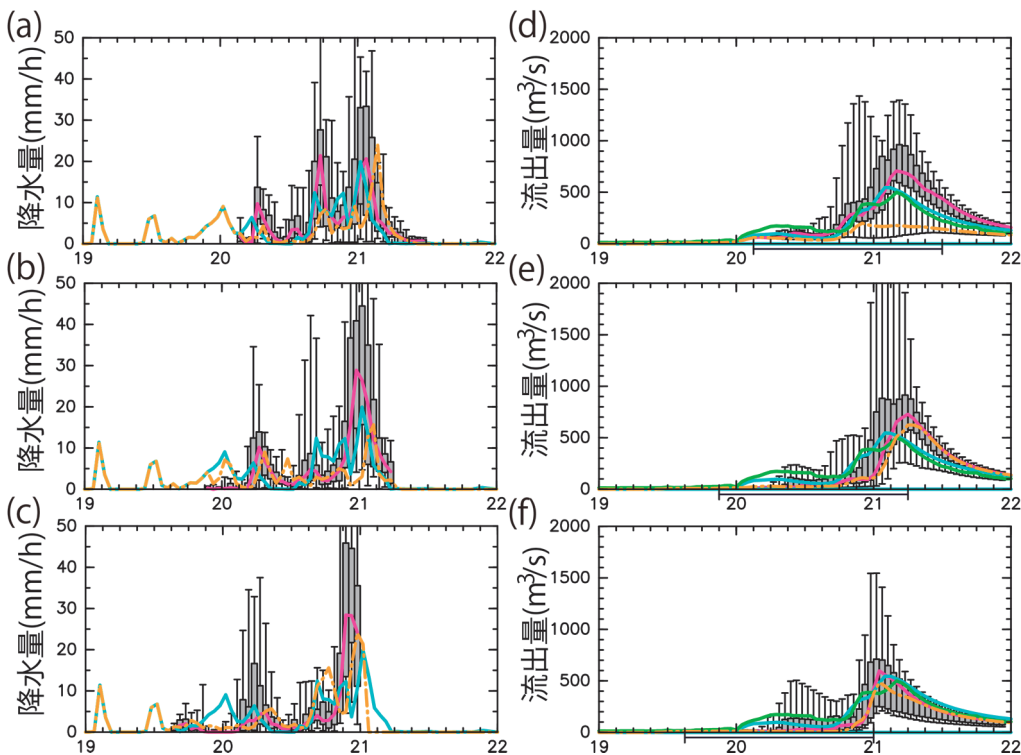


図-4 台風15号の降水予報および流出予測。(a)~(c)は予測降水量、(d)~(f)予測流出量。(a)(d)は20日3時から、(b)(e)は19日21時から、(c)(f)は19日15時からの予測。凡例は図-3と同様。

の予報でもその影響が現れたものと考えられる。また、アンサンブル中央値は、流出量を大幅に過大評価した図-3dおよび図-3fの決定論的予測に比べて精度が向上した。不確実性については、観測ピーク流量約400m³/sに対して、アンサンブル予測は100~1400m³/sの広い範囲に分布しており、不確実性が大きいことを示した。

同様に、台風15号の予測結果を図-4に示す。降水予報(図-4abc)のアンサンブル中央値は、3つの予報がそれぞれ観測降水量のピークを捉えており、出現時刻もよく一致した。台風15号は、台風12号と比べて気象庁の台風進路予報の精度が高く、本報告の予報計算でも比較的予報が容易な事例であった。図-4defの流出予測についても、概ねアンサンブル予報中央値は観測に基づく流量とよく一致していた。決定論的予測に基づく流量予測は、大幅に過小評価となっている部分があったが、アンサンブル予測は常に高い精度を保持していた。

4. まとめ

欧州で進められている、アンサンブル予報と流出モデルを組み合わせた、アンサンブル洪水予測を行ない、予測精度を評価した。対象は、2011年に関西地域で大きな被害を出した台風12号・15号である。アンサンブル予報による降水量予報および流出予測結果は、両台風に対して決定論的予報よりもピーク流量の値や出現時刻について改善が見られ、アンサンブル予報により精度向上効果があることが示された。

台風15号の流量予測では、アンサンブル中央値が観測に基づく流量と近い値を示した。台風12号については、アンサンブル中央値は観測に基づく流量に対してピーク流量値は一致したもの

の、出現時刻を実際よりも早く予測した。このように、台風事例によって予報精度は一定ではないことが示された。

本研究の実験の結果、アンサンブル予報と流出モデルを組み合わせた洪水予測手法は、日本における台風事例においても有効であることが示された。今後、低気圧や前線性など成因の異なる豪雨に伴う洪水事例に適用し、アンサンブル洪水予測手法の有効性をさらに検証していく予定である。

謝 辞

本研究は、JSPS科研費24560632の助成を受けた。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。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) Cloke, H. L., and F. Pappenberger: Ensemble flood forecasting: A review. *Journal of Hydrology*, 375, pp.613-626, 2009
- 2) Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D*, 230, pp.112-126, 2007
- 3) Miyoshi, T., and M. Kunii: The local ensemble transform Kalman filter with the weather research and forecasting model: experiments with real observation. *Pure and Applied Geophysics* DOI 10.1007/s00024-011-0373-4, 2011
- 4) 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, *Hydrological Science Journal*, 57, pp.198-312, 2012
- 5) 牛山朋来、佐山敬洋、岩見洋一、三好建正: 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、河川技術論文集、第20巻、pp.455~466、2014

牛山朋来



土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター水災害研究グループ 専門研究員
Tomoki USHIYAMA

佐山敬洋



京都大学防災科学研究所社会防災研究部門防災技術政策研究分野 准教授
Takahiro SAYAMA

岩見洋一



土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター水災害研究グループ 上席研究員
Yoichi IWAMI