平成23年7月新潟・福島豪雨に伴う阿賀野川洪水 水のアンサンブル洪水予測実験

ENSEMBLE FLOOD FORECASTING OF AGANO RIVER FLOOD DURING
NIIGATA-FUKUSHIMA TORRENTIAL RAINFALL IN JULY 2011

牛山朋来¹・佐山敬洋²・岩見洋一³

Tomoki Ushiyama, Takahiro Sayama, and Yoichi Iwami

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) 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³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)

Recent advances of regional ensemble weather predictions have increasingly improved predictability of rainfall forecasts, which would be useful for streamflow forecasts. We have developed an ensemble flood forecasting system, composed of an ensemble Kalman filter and regional model WRF (Weather Research and Forecasting) in atmospheric part, and Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) model in hydrological part. We examined feasibility of the flood forecasting system on the Niigata-Fukushima torrential rainfall event in July 2011. The ensemble flood forecasting system showed improvements compared to deterministic forecasts in average accuracies and predictability of peak flow. However, the forecasting system failed to predict the largest flow peak in this event, because it could not predict the third of the main three rainfall peaks. It could improve the accuracy of JMA forecasts. However, at the same time, it depended on JMA forecasts accuracy. This study showed the advantages and limits of this ensemble flood forecasting system.

Key Words : *Niigata-Fukushima torrential rainfall, Numerical weather prediction, Ensemble prediction, Ensemble Kalman filter, LETKF, WRF, QPF*

1. はじめに

近年、数値天気予報技術の持続的発展により降水量予測精度が向上し、欧米諸国では予報降水量を用いた洪水予測が研究のみならず現業でも行われている^{1,2)}。例えば、ヨーロッパの7カ国は、共同でCOSMO-LEPS (Consortium for Small-scale Modeling-Limited Area Ensemble Prediction System, 格子間隔7km)と呼ばれる5.5日先までの領域アンサンブル予報を行い、アンサンブル洪水予測を現業で行っている^{1,2,4)}。これに対して日本では、レーダー解析雨量とその時間外挿による6時間先までの降水短時間予報を用いた洪水予測が行われているが、数値予報を利用した洪水予測はまだ少数の研究例にとどまる。

数値天気予報による降水予報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有用である。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可能である³⁾。

著者らは、これまでアンサンブルカルマンフィルターを用いた領域アンサンブル予報を開発し、予報降水量を水文流出モデルに導入することにより、洪水予測の精度向上について調べてきた⁵⁾。これは、高解像度でアンサンブル予報を行うものであり、洪水を引き起こす豪雨の予報精度の改善とともに、雨量の確率分布を含む予報が得られる。今回は、2011年7月に発生した、平成23年7月新潟・福島豪雨に伴う阿賀野川洪水に対して、アンサンブル洪水予測を行い、その予測可能性を調べた。

2. 新潟・福島豪雨と阿賀野川洪水の概要

2011年7月26日から7月30日にかけて、新潟県中越地方、下越地方、福島県会津地方で集中豪雨が発生し、新潟県では堤防が決壊するなどの大きな洪水被害をもたらした。この豪雨は、気象庁により、平成23年7月新潟・福島豪雨と名付けられた。

図-1のように、降水量は7月27日から30日の4日間で、

図-1. 気象庁全国合成レーダーによる新潟・福島豪雨期間(7月27日～30日)の総降水量(mm)。赤線が流域界を表す。

新潟福島県境付近を中心に800mmを超えた。今回の豪雨は、前線が日本海から新潟県付近に停滞し、本州南海上の太平洋高気圧を回りこむように、湿った空気が新潟県付近の前線に流入することによって発生した。同様の地域で、平成16年7月新潟・福島豪雨があったが、今回はそれを上回る豪雨となった。

この豪雨の影響で、新潟県では、信濃川水系の6つの河川で堤防の決壊が発生し、三条市など広範囲で浸水被害が発生した。

一方、阿賀野川水系では、只見川沿いの柳津町から只見町にかけて、橋や町道の流出、民家の全壊、浸水などの被害が相次いだ。只見線では会津川口駅と会津大塩駅間で橋桁が流出し、鉄橋が崩落したほか、会津坂本駅、会津柳津駅間で路盤が流出し、会津坂下駅と大白川駅間が不通となった。また、新潟県内の阿賀野川頭首工付近の小松地区では、無堤部で浸水被害が発生した。

豪雨の影響で、阿賀野川下流域の馬下(図-2左上)では、10,000 m³/sの既往最大流量を記録し、7月30日4時から18時(日本時間)まで氾濫危険水位を超えた。一方、上流の山科地点(図-2右)での洪水規模は小さかった。これは、会津東部を流れる阿賀川本川よりも、図-1のように、会津西部を流れる只見川流域で豪雨の影響が大きかったためである。

このように、平成23年7月新潟・福島豪雨による阿賀野川水系の洪水は、社会的に大きな影響を残した。このような洪水を、早期に予測することは、避難準備や洪水対策を行う上で社会的意義が大きいと言える。

3. 方法

本研究では、領域アンサンブル予報により降水量を予報し、その雨量情報を水文流出モデルに導入する。

図-2. 阿賀野川流域の支流分布と流量計地点。色は集水面積を表す。

(1) 領域アンサンブル予報

初期値をわずかにずらした多数の予報計算を同時に行うアンサンブル予報により、予報の広がりから結果の信頼性に関する情報を得ることができる。また、アンサンブル予報の方が単独予報よりも一般に精度が高く、さらに極端現象の見逃しが少なくなる、等の利点がある。

現在、気象庁で行われている週間アンサンブル予報などは、全球を対象としているため解像度は40km以上であり、洪水の原因となる豪雨を定量的に予報することは難しい。そこで本研究では、降水過程を精度良く表現するため水平解像度3kmを用いる。さらに限られた計算機資源による運用を可能にするため、計算領域を限定した領域アンサンブル予報を用いる。

アンサンブル摂動作成とデータ同化手法として、アンサンブルカルマンフィルターを用いる。これは、モデル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求めることを目的としたデータ同化手法である。本研究で用いたアンサンブルカルマンフィルターは、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ー(LETKF)⁶⁷⁾である。この手法は、観測誤差共分散の局所化により並列化効率を高め、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。

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。

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、アメダス(風、気温、相対湿度)およびGPS可降

図-3. モデル計算領域. 上が外側領域, 下が内側領域. 色は標高(m)を表わす.

水量である. GPS可降水量のLETKFへの同化の方法は, Seko et al.(2013)⁸⁾の方法を用いた. データ数は6時間分で東西風・南北風・気温は2000~7000個前後である.

計算領域として, 図-3のように, 新潟・福島県を中心とした1500km四方の領域を外側領域とし, さらに375km四方の領域を内側領域として設定した. WRFモデルの主要設定を表-1に示す. 格子間隔は15kmおよび3kmである. 境界条件は, 気象庁領域予報モデルMSM (計算格子間隔5km) を主に用いた.

なお, 領域アンサンブル予報では, 側面境界摂動を与えることで, アンサンブル予報値のばらつき (アンサンブルスプレッド) を維持し, データ同化の効率を維持することが出来る. 今回は, 初期値として, 7月17日12時の気象庁週間アンサンブル予報の50メンバーから, 対象領域中心の摂動が大きな21メンバーを選び, 24時間積分したものを初期値とした. また, 初期値から得られた摂動を, 側面境界摂動として外側モデルの境界に与えた.

WRF-LETKFによる計算手順を図-4に示す. 太い右向き矢印がWRFによる21メンバーのアンサンブル予報を表わす. WRFによる9時間予報が終了した後, 縦の小さな赤矢印で示された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予報サイクルの初期値として用られ (青い曲線矢印), 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.

なお今回は, 外側と内側モデル領域を持つ2重ネス

表-1. WRFモデル設定

格子数	101×101×40/ 126×126×40
水平格子間隔	15km/3km
計算時間(外側領域)	2011 年 7 月 18 日 12 時~30 日 15 時 UTC
計算時間(内側領域)	2011 年 7 月 27 日 12 時~30 日 15 時 UTC
初期, 境界条件	気象庁 MSM,1 部 NCEP gfs4 を流用
雲物理過程	WSM 3class / Lin スキーム
境界層過程	MYNN2.5 スキーム
土地利用分布	USGS 30 秒間隔

図-4. LETKFの計算進行の概念図

ティングであるため, まず外側モデルの計算を最後まで行ってから, その情報を用いて内側モデルの計算を行う, 一方向ネスティングで行った.

ここまでで, 各時刻のアンサンブル解析値が得られた. これらを用いて, 気象庁MSMの予報値が利用できる, 33時間先までの予報実験を行った. 今回は, 7月28日~29日の豪雨を対象として, 28日09時~29日18時, 28日15時~30日00時, 28日21時~30日06時までの3種類の時間帯を対象とした. なお, 本研究では特に断らない場合, 時刻はUTCとする.

(2) 流出予測

領域アンサンブル予報で得られた降水量分布を用いて流出計算を行った. 用いたモデルは, 分布型降雨流出・氾濫モデルであるRainfall-Runoff-Inundation (RRI)モデルである⁹⁾. 地表面流については2次元拡散波近似解析を行い, 鉛直浸透流を反映している. 対象流域は図-2の阿賀野川流域 (流域面積7710km²) である. 標高・流向・集水面積は, HydroSHEDS (15秒解像度) を用いた.

本研究では河川流量の予測可能性に着目し, まず気象庁Cバンド全国合成レーダー雨量を用いて計算流量が観測流量と合うようにキャリブレーションを行った. 洪水時の猪苗代湖からの流入による寄与は少ないと考えられたため, 流入をゼロと仮定した. その結果, 馬下・片門・山科・宮古・南大橋における流量は, 図-7, 8, 9 (観測流量が緑線, レーダー雨量による計算流量が水色) のように, 観測と同程度になった.

洪水予測における流出計算では, 洪水予報の現状をふまえ, 天気予報による降水量と, 予報時点まで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, 33時間先までの流出予測

図-5. 7月29日(JST)の日降水量分布. (a) 気象庁全国合成レーダー雨量, (b) LETKF解析値, (c)～(e) 決定論的予報, 上から28日09時, 28日15時, 28日21時を初期値とする予報, (f)～(h) アンサンブル予報の平均値, 上から28日09時, 28日15時, 28日21時を初期値とする予報.

を行った. なお, 降水量の予報期間以降は, 降水量をゼロとした.

4. 結果

図-5に, 7月29日の観測および予報雨量分布を示す. 図-5(a)のレーダー観測値は, 新潟福島県境に雨の極大があり, 福島県側の阿賀野川流域にも300mm以上の雨域がかかっていた. それに比べて, 図-5(b)のLETKF解析値は, 雨量はやや過小評価していたが, 雨の極大の分布を良く表現した.

図-5(c)～(e)のMSMをダウンスケーリングした決定論的予報の結果は, それぞれ強い雨域が県境付近にあり, 雨量の最大値もレーダー観測と同等である. しかし, 主な雨域は新潟県側に偏り, 福島県側の雨量は比較的小さい. 図-5(f)～(h)のアンサンブル予報平均値では, 総じて雨量は少ないものの, 28日15時を初期値とする図-5(g)は雨量も比較的大きかった.

続いて, 図-6に阿賀野川流域平均雨量の時間変化を示す. (a)～(c)は3種類の初期時刻からの33時間予報を表す. アンサンブル中央値(ピンク色)は, 観測値(水色)と比べ過小評価していた. しかし, 28日後半から29日06時までの観測雨量のピークは, アンサンブル予報の25～

75%の範囲にほぼ入っていた. 一方, 観測に現れる29日16時の雨のピークは, 決定論的予報とアンサンブル予報のほとんどで予報できなかった. しかし, (a) (b)の一部のアンサンブルメンバーはこの降水ピークを予報しており, アンサンブル予報の優位性がみられた.

図-7に阿賀野川下流の馬下地点における流量の予測値を示す. 図-7(a)のアンサンブル予測は過小評価しており, 決定論的予測の方が優れていた. 図-7(b)ではアンサンブル中央値と決定論的予測はほぼ一致し, 図-7(c)ではアンサンブル中央値の方が観測に近かった. なお, 29日16時の降水ピークに対応すると考えられる30日3時頃の観測流量ピークは, いずれの予測でも表現できなかったが, 図-7(b, c)では一部のアンサンブルメンバーがこの流量ピークの出現を予測していた. しかし, これらの予測が観測ピーク流量に達しなかったのは, 29日16時の降水ピークを予報したアンサンブルメンバーが, 必ずしも降水期間を通した総雨量を適切に予報していなかったためと考えられる. 図-7(b, c)の予測開始から24時間程度は, 観測流量はアンサンブルの25～75%の範囲に収まっていた.

図-8は片門地点, つまり合流前の只見川の流量である. 全体の傾向として, 図-7の馬下の流量と似ているのは, 阿賀野川本川の流量の多くを只見川からの流出が占めるためである. 一方, 図-9の山科地点の流量は, 縦軸

図-6. 阿賀野川流域平均雨量の時系列. (a) 28日09時, (b) 28日15時, (c) 28日21時をそれぞれ初期値とする予測. 水色はレーダー観測, オレンジは決定論的予測, 灰色の領域はアンサンブル予測の25~75%, 縦棒はアンサンブル予測の最大~最小, ピンク色はアンサンブル中央値である. 横軸は日付(UTC).

図-7. 馬下地点のハイドログラフ. (a) 28日09時, (b) 28日15時, (c) 28日21時をそれぞれ初期値とする予測流量. 水色はレーダー観測による計算, 緑色は観測流量, オレンジは決定論的予測, 灰色の領域はアンサンブル予測の25~75%, 縦棒はアンサンブル予測の最大~最小, ピンク色はアンサンブル中央値である. 横軸は日付(UTC)で, 横軸の下のは降水予報範囲を示す.

図-8. 片門地点のハイドログラフ. 凡例は図-7と同様である.

が $3500\text{m}^3/\text{s}$ までとなっているように, 相対的に流量は小さい.

図-9. 山科地点のハイドログラフ. 凡例は図-7と同様である.

図-8の只見川の流量予測は, 予測開始から18時間程度

はアンサンブル予測が観測流量を包含する場合もあるが、29日後半の流出ピークはほとんどの場合予測できなかった。全体に、予測流出ピークが現実より早く見えるのは、図-6に見られるように、降水予報開始直後は観測値に近い降水量を予報するものの、その後の29日16時の降水ピークを予報できなかったためである。また、図-8(b)の一部のアンサンブルメンバーだけが流出ピーク出現の可能性を示したが、これが図-7(b)の馬下の流量ピークの予測につながったものと考えられる。

一方、図-9の山科地点の流量予測は、予測の初期値が新しくなるに従って、アンサンブル予測の精度が向上し、また常に決定論的予測を上回っていた。特に、図-9(c)では、予測開始から33時間先までの全ての流出量がアンサンブル予測の25~75%の範囲に収まっていた。

5. 議論

アンサンブル流量予測は、山科のアンサンブル予測中央値が決定論的予測よりも観測に近く、また一部のアンサンブルメンバーが馬下の30日初めの流出ピークを示唆するなど、決定論的予測よりも優れた点を示した。しかしながら、最も大きな流量を記録した30日3時（日本時間12時）の馬下の流量ピークを予測することができなかった。これは、今回の洪水期間で大きく3つの降水のピークがあった中で（図-6）、29日0時の第2のピークは予報できたものの、29日16時の第3のピークを、ほとんどのアンサンブルメンバーが予報できなかったためである。

一方、山科地点の流量予測は、33時間先までの流量を予測できた場合もあり、片門地点の予測に比べて精度が高かった。これは、只見川上流の新潟県境の降水量予報精度が低かったのに対し、流域の東半分当たる阿賀川上流域の降水予報精度が高かったためと考えられる。只見川上流域の降水予報については、親モデルの気象庁MSMでも、豪雨の予報位置が外れていた。気象庁MSMが予報を外した場合、本研究のアンサンブル予報システムも、雨を予報するのが難しい、という限界が現れたものと考えられる。しかしながら、アンサンブル予報では、初期値や境界条件に摂動を入れることによって、一部のメンバーが決定論的予報では予報できなかった29日16時の第3の豪雨を予報できたことは、一定の改善があることを示した。

図-7や図-9では、初期値が新しくなるとともに、全体として予測精度が向上している。これは、予測精度が初期時刻に依存して変動することを意味している。つまり、決定論的予測と同様、アンサンブル予測も、初期時刻によって精度が変動することを示しており、運用上注意すべき点である。

6. 結論

領域モデルWRFとアンサンブルカルマンフィルターを用いたアンサンブル予報と、RRIモデルによる流出計算を組み合わせたアンサンブル洪水予測システムを、平成23年7月新潟・福島豪雨の阿賀川洪水に適用した。

その結果、アンサンブル中央値が決定論的予測よりも観測に近いことが多く、また決定論的予測で予測できなかった流出ピークを一部のアンサンブルメンバーが予測できたりと、一定の予測精度改善効果が現れた。しかしながら、阿賀野川下流域や只見川で最大流量を記録した流出ピークを予測することができなかった。これが、現在の予測システムの限界だと考えられた。

今後さらに多くの事例について検証を行い、予測システムの適用可能性について調査を進める予定である。

謝辞：本研究はJSPS科研費24560632の助成を受けた。気象庁のMSMデータおよび全国合成レーダーデータは、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) Marsigli, C., Boccanera F., Montani A., Paccagnella T., The COSMO-LEPS mesoscale ensemble system: validation of the methodology and verification. *Nonlinear Proc. Geophys.* 12, pp. 527-536, 2005.
- 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. 455-460, 2014.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Seko, H., T. Tsuyuki, K. Saito, and T. Miyoshi: *Data assimilation for atmospheric, oceanic and hydrologic applications (Vol. II)*, doi 10.1007/978-3-642-35088-7_20, pp.489-507, 2013.
- 9) 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.

(2015.9.30受付)