

2010 年パキスタン洪水をもたらした豪雨のダウンスケーリング再現実験

牛山朋来・Rana Muhammad Atif・佐山敬洋・建部祐哉・藤岡奨・深見和彦(土木研究所)

1. はじめに

2010 年 7 月末パキスタン北部を襲った豪雨により、インダス川流域では史上最悪の洪水被害に見舞われた。流域全体での死者は 1700 人以上、1800 万人が被害を被った。洪水は最初パキスタン北西部の Kyber Pakhtunkhwa (KPK) 県で急激増水として発生、続いてインダス川を南下することにより中下流の広域で洪水を引き起こし、家屋・作物・家畜に大きな被害を出した。KPK 県における豪雨は、カブール川流域で急激増水を引き起こし、流域底部平坦地のペシャワール盆地では大規模な洪水をもたらした。ペシャワールでは年降水量(346 mm)の 80%が 7 月 29 日の 1 日で降り、ここだけで 1156 人の死者を出した。

このような歴史的被害を出したのは、夏季モンスーン降水が通常パキスタン北部の東側で降るのに対し、この年は西側で降ったためである。その原因として、ヨーロッパ東部でブロッキング高気圧が居座り、その東側で深い気圧の谷が維持されたことが指摘されている。この気圧の谷に沿って対流圏上層で高渦位が南へ移流するのに同期して、7 月末のパキスタン北部豪雨があったことが指摘されている(Hong et al., 2011; Lau and Kim, 2012)。

このような洪水範囲の把握のため、降雨流出洪水(Rainfall Runoff Inundation, RRI)モデルの開発が進められ、雨量分布を与えることにより精度の高い洪水範囲の予測が可能になりつつある(Sayama et al., 2012)。しかし、パキスタンでは雨量計の数が限られているため、GSMaP (The Global Satellite Mapping of Precipitation, Okamoto et al., 2005)のような衛星雨量観測に頼らなければならない。しかしながら、衛星雨量は値の信頼性や観測間隔などの点に問題点がある。一方、カブール川流域のような急激増水では、降雨後 1~2 日後に洪水が発生するため、降雨後に避難などの洪水対策をとっても間に合わないといった問題がある。そこで、数値予

報と RRI モデルを組み合わせた洪水予測が求められる。このような洪水予測は日本ではまだ行われていないが、世界の趨勢である(Cloke and Pappenberger, 2009)。

Webster et al.(2011)は、ECMWF EPS を用いた降雨確率分布解析から、パキスタン北部の洪水をもたらした豪雨は 6~8 日前から予測可能だったと主張している。この豪雨が東ヨーロッパのブロッキング高気圧と密接な関係があり(Hong et al., 2011; Lau and Kim, 2012)、ブロッキング高気圧の発達がいくつかの全球 EPS によって 9 日前から予測できていたこと(Matsueta 2011)と合わせると、十分実現可能な仮説である。

そこで本研究では、上記仮説の真偽を確かめるため、全球予報と RRI モデルを組み合わせた洪水予測実験を行った。全球予報は NCEP GFS の決定論的予報を用いたが、様々な初期時刻の予報ランを用いてタイムラグアンサンブルを構成した。さらに、全球予報を領域モデル WRF によりダウンスケールした場合の効果も調べた。これらの予報降水量分布を RRI モデルに入力し、洪水予測計算を行った。それらの結果を衛星雨量を用いた計算結果と比較し、検討を行った。

2. 方法

実験対象は、2010 年 7 月 27 日 0 時~7 月 30 日 0 時までに降った雨により発生した、インダス川上流のカブール川流域の洪水である。NCEP GFS は 7.5 日先までの予報が提供されているため、7 月 30 日 12 時までをカバーする 23 日 00UTC~28 日 00UTC を初期値とする予報ランを用いた。GFS は 1 日 4 回の予報を行っているため、全部で 21 個のランが対象となる。

WRF によるダウンスケーリングの計算領域は、モンスーンの影響を表現できる領域として、パキスタンを中心とする東西 4000km × 南北 3000km、水平解像度 20km とした。また、カブール川周辺の降雨予測精度向上のため 2 重ネステイングを行い、東西 1245 km

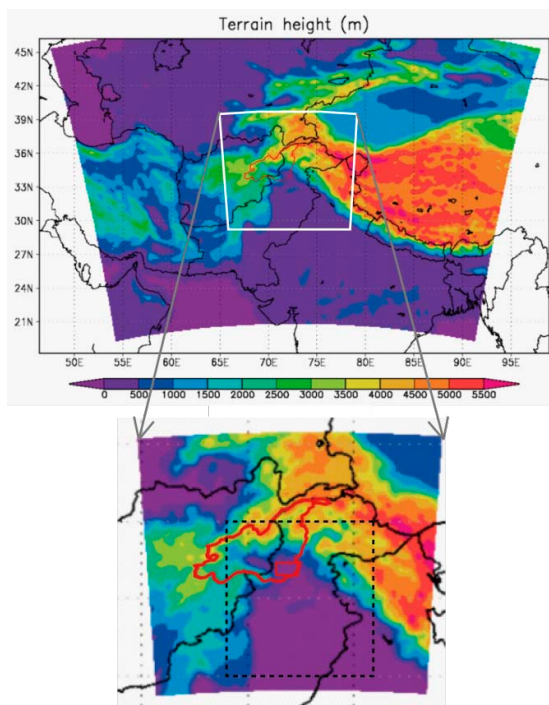


図 1 : ダウンスケーリング計算領域。上図は外側フレーム、下図は内側フレームを表わす。下図の黒破線四角はパキスタン北部解析領域(北緯 30-36°、東経 69-76°、Webster et al., 2011 と同じ)、赤い閉曲線はカブール川流域、赤小四角はペシャワール盆地である。

×南北 1125km、水平解像度 5km を内側フレームとした(図 1)。両者とも Kain-Fritsch の積雲対流パラメタリゼーションを用いた。領域内の地形および土地利用分布は USGS のものを用いた。

検証のため用いた衛星雨量は GSMaP ($0.1^\circ \times 0.1^\circ$, 1 時間毎)を用いたが、この地域の観測値は地上雨量計に比べて過小であるため、地上雨量計の値をもとに補正を行った。

RRI モデルは Sayama et al.(2012)のもので、流域および河川を 2 次元格子で表現する分布型流出モデルと呼ばれるものであり、流量と氾濫量をそれぞれ求めることができる。RRI モデルによる流出計算は 7 月 27 日 00UTC~8 月 2 日 00UTC まで行った。

3. 結果

27 日~29 日の 3 日間の地上降水量の観測値、27 日 00UTC を初期値とする GFS 予報値、

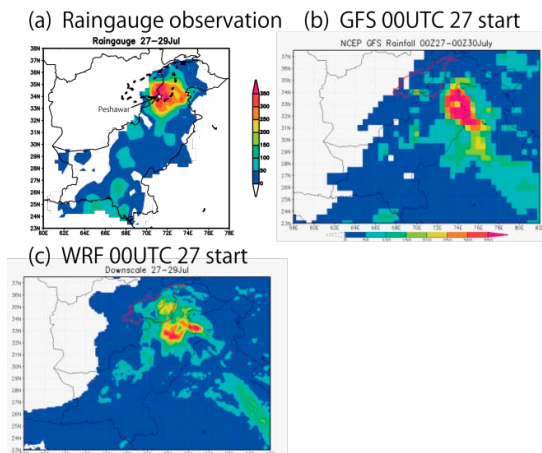


図 2 : 7 月 27 日~29 日の地上降水量、(a)地上雨量計、(b)GFS の予報値、(c)WRF によるダウンスケール予報値。

WRF によるダウンスケール予報値の一例を図 2 に示す。図 2a の観測ではパキスタン北部アフガニスタン国境付近で、カブール川流域に最大 350 mm 以上(ピンク色)の降雨が観測された。一方図 2b の GFS 予報では、大量の雨が予報されているものの、雨域は東に偏り、カブール川流域には降っていない。図 2c のダウンスケーリングの結果は、全体として雨域が西に移り、カブール川流域内でも降水が予報された。

次に、図 3 に図 1 の黒破線で示されたパキスタン北部領域(Webster et al., 2011 と同じ)の平均降水強度の時系列を示す。図 3a の GFS 予報値も、図 3b のダウンスケール予報値も、それぞれ 28 日と 29 日にピークを持つ位相の合った変動をしており、オレンジ色で示した補正 GSMaP と同程度の降水強度を示したものが多かった(それぞれ 16 本の黒線)。一方青線で示した時系列は、補正 GSMaP と比べて積算雨量が 85%に満たなかった予報ランで、それぞれ 5 個ずつあった。以上のことから、パキスタン北部領域の平均雨量変動については、GFS・ダウンスケール予報ともに、予報できていたものが多かったと言える。

続いて図 4 に、カブール川流域の平均降水量の時系列を示す。図 3 のパキスタン北部領域平均とは異なり、予報値のばらつきが大きいことがわかる。図 4a の GFS 予報値では、21 予報ラン中 6 個が予報成功基準(積算雨量が補正 GSMaP の 85%)を超えたが、残り

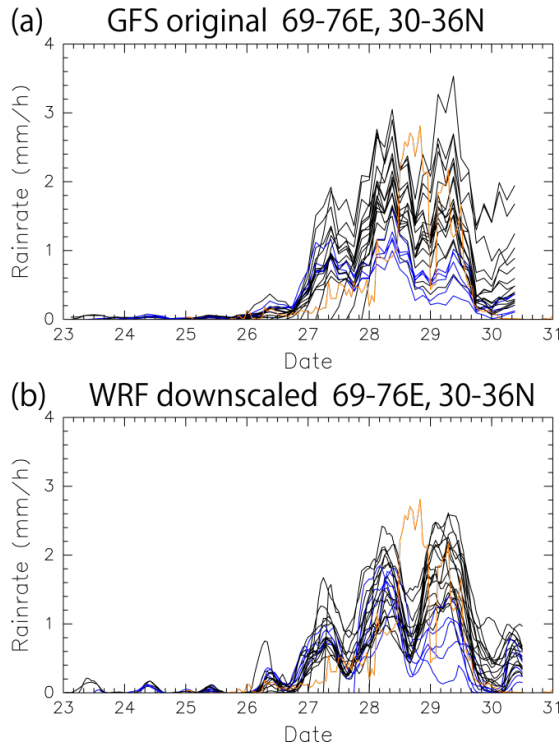


図 3 : パキスタン北部領域の平均降水強度の時系列。(a)GFS 予報値、(b)ダウンスケール予報値。黒線は予報成功基準を越えるもの、青線は基準を下回ったもの。オレンジ線は補正 GSMaP によるもの。

の 15 個は基準を下回った(青線)。また、基準を上回った予報ラン(黒線)も、補正 GSMaP に比べて過大の値を示した。

それに対して、図 4b のダウンスケール予報では、21 予報ラン中 10 個が基準を上回った。また、GFS では過大を示していた予報値も補正 GSMaP に近いものに修正された。これらのことから、ダウンスケーリングによって予報精度が向上したことがわかる。また、図 3 のパキスタン北部領域の平均では観測に近い値を予報できていたのに、図 4 のカブール川流域平均では過小の予報となったものが多かった。これらは、雨域を予報していたものの、位置が観測とずれていたものと考えられる。

これらの予報結果から、豪雨が降った 3 日間の積算雨量と初期時刻との関係をまとめたものを図 5 に示す。図 5ab とともに予報初期時刻が降水時刻に近づくにつれて、予報雨量が増加し、予報精度が向上していた。図 5a

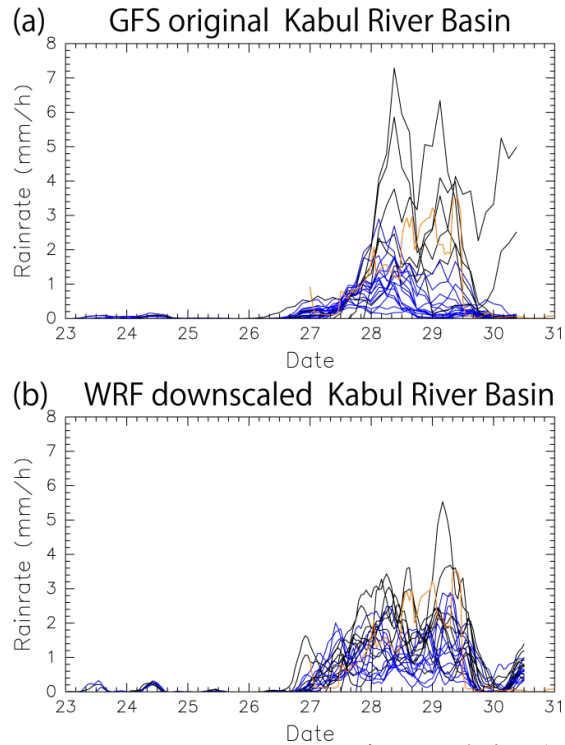


図 4 : 図 3 と同じ、ただしカブール川流域平均降水強度。

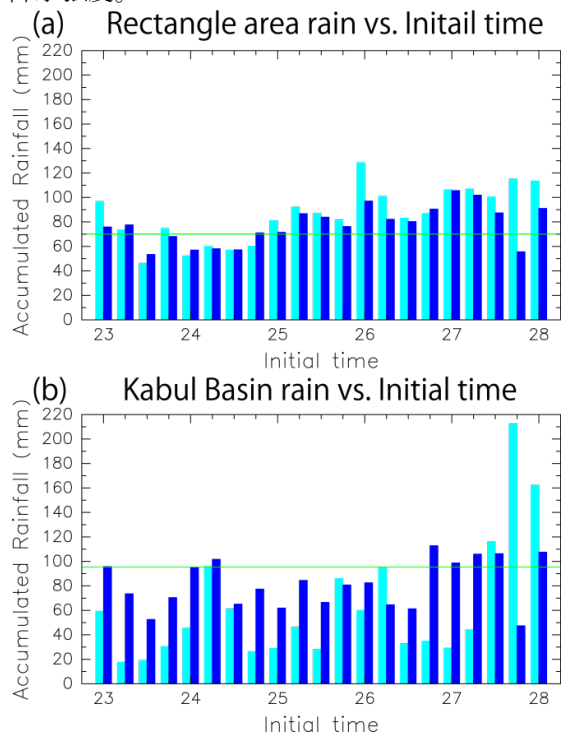


図 5 : 27 日~29 日の積算雨量と予報初期時刻との関係。(a)パキスタン北部領域平均、(b)カブール川流域平均。水色が GFS、紺色がダウンスケール予報の結果である。

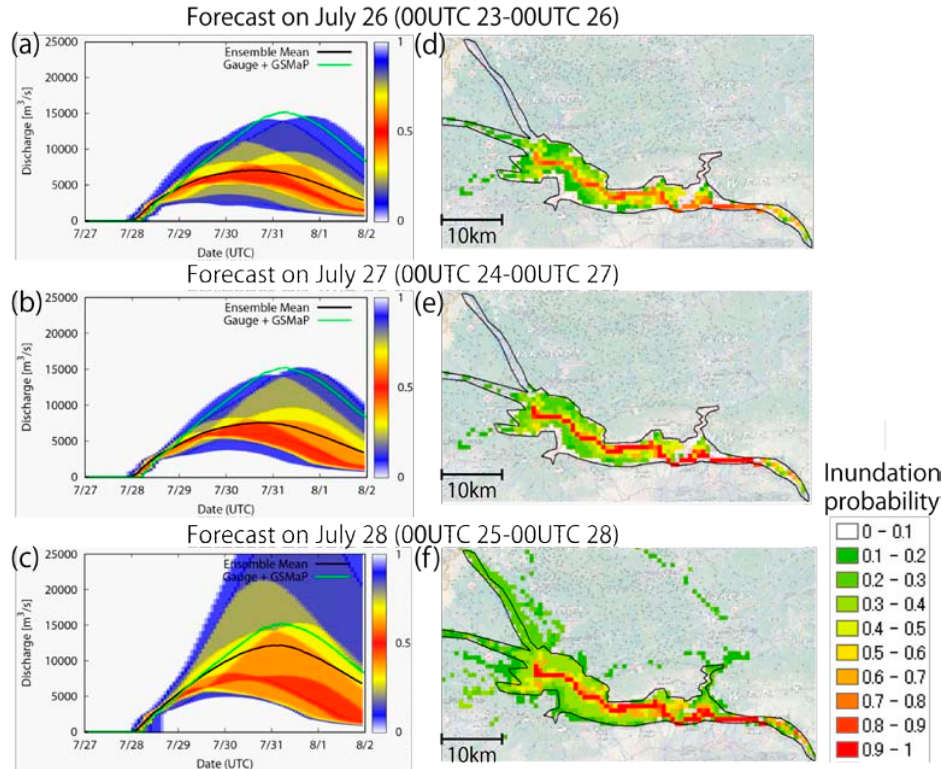


図 6: GFS 降水予測と RRI モデルを用いたタイムラグアンサンブルによるカブール川流域出口の流量予測の確率分布(a)~(c)と、洪水範囲の確率分布(d)~(f)。(a),(d):23 日 00UTC~26 日 00UTC までを初期値とする予報ランのアンサンブル、(b),(e): 24 日 00UTC~27 日 00UTC を初期値とするランのアンサンブル、(c),(f): 25 日 00UTC~28 日 00UTC を初期値とするアンサンブル。(a)~(c)の黒線はアンサンブル平均、緑線は補正 GSMaP による結果を表わす。(d)~(f)の黒線枠は、MODIS 衛星観測による 8 月 1 日の洪水範囲である。

のパキスタン北部領域平均では、GFS とダウンスケール予報との差は小さいが、図 5b のカブール川流域平均では差は大きく、ダウンスケーリングによる精度向上の効果が見て取れる。また、予報精度は周期的に変化していて、23 日 00UTC、24 日 00~06UTC、26 日 00UTC 付近で高くなっていた。ダウンスケール予報では 26 日 18UTC 以降はほぼ安定して高精度の予報ができていたが、GFS の場合は予報が安定して基準を越えるようになったのは 27 日 12UTC の降雨開始後だった。

次に GFS 降水予報と RRI モデルによるカブール川の流量予測と、ペシャワール盆地の洪水予測結果を図 6 に示す。それぞれ 13 個の予報を用いたタイムラグアンサンブルである。26 日または 27 日までの予報値を用いた図 6ab は、流量予測の確率分布は辛うじて

観測をカバーしているものの、確率は小さく、アンサンブル平均は過小評価していた。一方 28 日までの予報値を用いた図 6c は、アンサンブル平均は観測値に近づいたが、確率分布の広がりが大きく、依然として予報精度は低い。図 6d~f の洪水範囲予測は、確率は低いものの、観測された洪水範囲を予測していた。

続いて、図 7 にダウンスケール降水予報を用いたアンサンブル流量予測および洪水予測結果を示す。図 7a~c の流出予測は、確率分布の幅が小さくなり、予報精度が向上している。また、アンサンブル平均は図 6 の GFS 予測を用いたものに比べて観測値に近くなり、さらに新しい予報ほど観測値に近づいている。また、図 7d~f の洪水範囲も予報確率が向上し、MODIS 衛星の観測値に近い分布となった。しかし、北西に延びる支流沿いの洪水は予測できなかった。これは、この支流

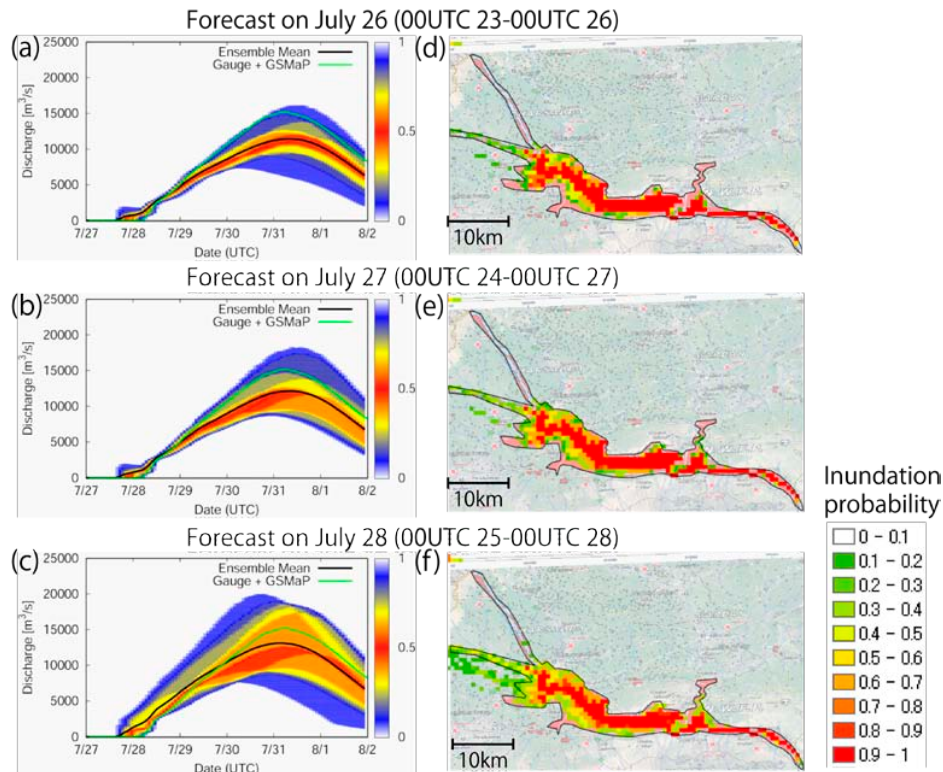


図 7：図 6 と同じ、ただしダウンスケール降水予測と RRI モデルを用いたタイムラグアンサンブルによるカブール川流域出口の流量予測の確率分布と洪水範囲の確率分布。

に対応する流域の降雨をうまく予測できなかったためと考えられる。

4. まとめ

NCEP GFS およびそれをダウンスケールした降水予測を RRI モデルに導入し、2010 年夏のカブール川流域の洪水予測実験を行った。Webster et al., (2011)で定義されたパキスタン北部領域(600km 平方以上)に対する平均予測降水量は、GFS もダウンスケール予測も、降雨開始 4 日前の 23 日に予測できていた。しかし、カブール川流域平均降水量は、ダウンスケールしなければ降雨開始以前に予測することはできなかった。降雨開始前を初期値とする GFS は、予測雨域の位置がずれていた。GFS の予測降水量を用いた洪水予測は、補正 GSMaP を与えた場合よりも流量と氾濫域を過小評価した。一方ダウンスケールした予測降水量を用いた場合、流量や氾濫域を精度よく予測することができた。カブール川流域程度の大きさの流域の洪水予測を行うためには、GFS そのままではなく、ダ

ウンスケールした予測降水量が有効であった。

謝辞

数値予測は、米国 NCEP 提供の GFS を用いた。ダウンスケーリングには領域モデル WRF を用いた。図の作成には地球流体電腦ライブラリ、GrADS を用いた。

参考文献

- Cloke, H. L. and F. Pappenberger, 2009: Ensemble flood forecasting: A review. *J. Hydrol.* **375**, 613-626.
- Hong, C.-C., H.-H. Hsu, N.-H. Lin, and Hsun Chiu, 2011: Roles of European blocking and tropical-extratropical interaction in the 2010 Pakistan flooding. *Geophys. Res. Lett.* **38**, L13806, doi:10.1029/2011GL047583, 2011.
- Lau, W. K. M. and K.-M. Kim, 2012: The 2010 Pakistan flood and Russian heat wave: teleconnection of hydrometeorologic

- extremes. *J. Hydrometeorol.* **13**, 392-403.
- Matsueda, M., 2011: Predictability of Euro-Russian blocking in summer of 2010. *Geophys. Res. Lett.* **38**, L06801, 6 PP., 2011 doi:10.1029/2010GL046557.
- Okamoto, K. et al., 2005: The global satellite mapping of precipitation (GSMaP) project. *25th IGARSS Proceedings*, 3414-3416.
- Sayama, T., G. Ozawa, T. Kawakami, S. Nabesaka, and K. Fukami, 2012: Rainfall-runoff inundation analysis of the 2010 Pakistan flood in the Kabul River basin. *Hydrol. Sci. J.* **57**, 298-312.
- Webster, P. J., V. E. Toma, and H.-M. Kim, 2011: Were the 2010 Pakistan floods predictable? *Geophys. Res. Lett.* **38**, L04806, doi:10.1029/2010GL046346, 2011.