

水害リスク分析の最大外力設定のための 可能最大降水量 (PMP) の推定

鳥取大学大学院工学研究科 准教授 矢島 啓

概要：

近年の豪雨による災害の多発、気候変動による降水量、流量の増加が予測される中、水害リスク分析の最大外力を洪水においても設定する必要性が議論されている。そこで本研究は、日本の直轄河川流域を対象とした「流域規模」と「降雨継続時間」に対応する可能最大降水量(PMP)及びそれから算出される可能最大洪水(PMF)の推定を目指した。

領域気象モデルWRFを用いた豪雨シミュレーションによる気象条件の変化と降水量の関係把握から、①台風性豪雨では、水蒸気フラックスの増加は、総雨量だけでなく時間分布も変化させるなど、河川計画上の重要な影響を明らかにした。②降雨継続時間毎、地域毎の降雨量と相関の高いある気圧面での水蒸気フラックスの関係から、水蒸気フラックスに関する長期データの最大値を用いたPMPの時空間分布の設定手法を示した。③複数洪水を対象とした流出計算により現行と気候変動を考慮した可能最大洪水(PMF)を算定する手法を示した。

キーワード：可能最大降水量、可能最大洪水、WRF、水蒸気フラックス、時空間分布、気候変動

1. はじめに

2011年の紀伊半島を中心に大規模な災害をもたらした台風12号、2013年の伊豆大島をはじめとする災害等、巨大台風等に伴う大規模な災害が頻発・激甚化している。また、国土技術政策総合研究所の研究¹⁾によると、地球温暖化に伴う気候変動により、今世紀末には全国一級水系の計画降雨継続時間での降雨量が1.1~1.3倍に、基本高水を超える洪水の発生頻度が1.8~4.4倍に増加する恐れがあるとされている。このような観点から、河川計画においても計画規模を超える最大クラスの外力を設定して検討を行う必要性が議論されつつあり、この一つの指標として可能最大降水量(Probable Maximum Precipitation; PMP)がある。可能最大降水量に関しては、近年その重要性が以下のように議論されている。2015年1月には社会資本整備審議会 河川分科会 気候変動に適応した治水対策検討小委員会から「水災害分野における気候変動適応策のあり方について 中間取りまとめ(案)」が発表され、国土交通省から「新たなステージに対応した防災・減災のあり方」が答申され²⁾、地震、津波では想定されている「想定最大外力」を洪水においても設定して被害を軽減できる対策に取り組むべきであるとしている。さらに、2015年2月には国土交通省「想定最大

外力(洪水、内水)の設定に関する技術検討会」が設置され技術的検討が開始されている。

このような背景を踏まえ、対象流域の特徴を踏まえた想定最大外力を設定する必要性が高い。そこで本研究では、日本の直轄河川流域を対象とした「流域規模」と「降雨継続時間」に対応する可能最大降水量(PMP)の推定およびそれから算出される可能最大洪水(PMF)の推定を目指す。特に、これまで日本の流域を対象に行われていない気象モデルWRFを用いた降水量と関連性の高い指標の把握と、長期データにおける指標の最大値からPMPとPMFを推定する方法を提案する。

2. 従来の研究

これまでのPMPの推定には、(1)統計的な方法、(2)DAD(Depth-Area-Duration;面積雨量-面積-降雨継続時間)解析結果を用いる方法、(3)気象条件を最大化する方法、(4)気象モデルを用いる方法などがある。しかしながら、山地流域を有する複雑な日本の地形条件での流域規模、降雨継続時間を対象としたPMPの研究は少ない。日本の河川流域を対象として気象モデルを用いた研究は、小林ら³⁾が渦位逆変換法を用いて1979年16号台風の初期位置を側方移動する仮想台風実験を行い、これに気候

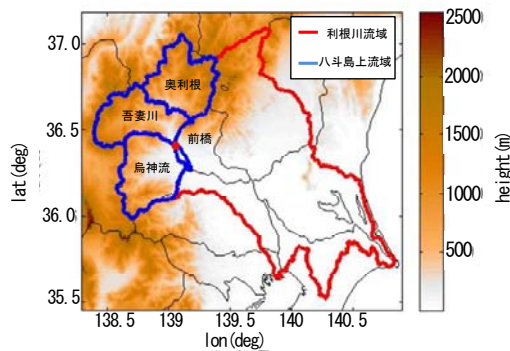


図-1 利根川流域図

変動に伴う将来の温暖化バイアスを加えた擬似温暖化実験を実施した。この結果、淀川流域における側方移動を行った積算雨量の最大値は、再現計算結果と比べ約 1.5 倍に達するとしている。この方法は台風経路と温暖化の影響を考慮したものであり、台風自体の降雨量に直接影響を及ぼすと考えられる水蒸気量などの気象条件を考慮した雨量の最大化が目的ではない。さらに、PMP の時空間分布を設定し、河川計画の直接的な外力である可能最大洪水(PMF)を推定する研究はほとんど見られない。

3. 気象モデルを用いた PMP と PMF の算定手法

(1) 検討対象豪雨

本研究では、図-1 に示す利根川八斗島基準地点上流域を対象に、利根川の計画降雨継続時間相当である 72 時間の流域平均雨量、さらに降雨の時間分布の変化を評価するため、流域平均 12 時間雨量および 24 時間雨量についても評価する。

WRF を用いた検討を行う豪雨は、表-1 に示す 6 豪雨を用いた。6 豪雨は実績の八斗島上流域平均 72 時間雨量が概ね 100mm 以上、および八斗島実績流量が 2,000m³/s 以上となっている降雨である。降雨成因は各降雨期間の気象庁天気図から判断し、台風性降雨が 2 降雨(豪雨 1, 豪雨 6)、台風および前線の影響を受けている降雨が 3 降雨(豪雨 2, 豪雨 3, 豪雨 4)、および前線性降雨が 1 降雨(豪雨 5)となっている。これらの中で、12, 24, 72 時間雨量のそれぞれが最大となるのは、豪雨 6 の 2007 年 9 月の台風 9 号による降雨である。

(2) 計算モデルと計算条件

本研究で使用する気象モデルは、豪雨のシミュレーションに実績のある WRF とした。WRF は米国国立大気研究センター(NCAR)、ペンシルバニア州立大学で開発されてきた非静力学モデルである。計算領域は図-2 に示すように、日本周辺の第 1 領域(16km 格子)、第 2 領域(4km 格

表-1 検討対象豪雨

豪雨番号	生起日	八斗島上流域平均雨量 (mm)			降雨成因
		12hr	24hr	72hr	
1	2001/09/10	72.0	120.8	175.2	台風 15 号
2	2002/07/11	84.9	127.8	159.2	台風 6 号, 梅雨前線
3	2004/10/09	55.7	86.2	98.4	台風 22 号, 前線
4	2004/10/21	70.0	93.4	107.6	台風 23 号, 前線
5	2006/07/19	72.7	126.7	225.8	梅雨前線
6	2007/09/07	110.0	149.9	258.3	台風 9 号

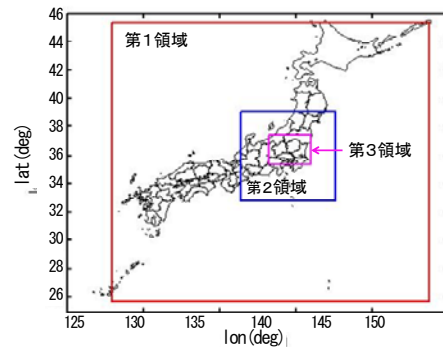


図-2 WRF 計算領域図

子)利根川流域を含む第 3 領域の 1km 格子の 3 重ネスティングとした。

各領域の計算時間ステップは、第 1 領域が 96 秒、第 2 領域が 24 秒、第 3 領域が 6 秒とした。計算の初期条件、境界条件には NCEP-FNL のデータを用いた。地形データには、国土地理院発行の数値地図 50m メッシュ標高を用いた。WRF による計算期間は、72 時間の助走期間を設定した上で 96 時間の計算を行い、そのうち八斗島上流域平均が最大となる 72 時間雨量について評価を行った。WRF の計算に用いる物理過程オプションは、豪雨の再現精度がもっとも高い結果となったスキームとして、雲微物理スキームは WSM 3-class simple ice scheme、境界層スキームには YSU scheme を用いて行う。

なお、豪雨の再現精度は、八斗島上流域の流域平均 72 時間雨量、最大時間雨量、ピーク発生時刻などについて解析雨量との再現性を確認している³⁾。

(3) 気象条件変化の検討ケース

本研究で対象とする PMP の推定に用いる主要パラメータである水蒸気フラックスの降雨の時空間分布に対する影響の評価は、WRF 実行時における初期条件および境界条件の相対湿度を変化させることにより検討する。

気象要素の変化は表-2 に示すように、相対湿度に関して、再現計算条件(ケース 1)に加え、その初期値・境界値に対して 10%を加える(減じる)、30%を加える(減じる)、および全層で 100%とする合計 6 ケース(ケース 2～6)を設定した。ただし、各ケースにおける相対湿度の最大値は 100%とした。

表-2 WRF における気象条件の検討ケース

ケース	変化要素	絶対変化量	備考
1	なし	-	再現計算
2	相対湿度	-30%	相対湿度を減少
3		-10%	
4		+10%	
5	相対湿度	+30%	相対湿度を増加
6		最大化	
			全層の相対湿度を100%

(4) PMP の推定手法

本研究で着目する雨量との対応をみる水蒸気フラックスは、前橋気象官署地点に最も近いWRFの計算格子地点における値を用いて評価する。具体的には、1時間毎の計算出力値から、1000～300hPaの各気圧面において水蒸気混合比に風速を乗じて水蒸気フラックスを計算し、継続する1, 3, 6, 12, 24, 48, 60, 72時間の平均値が最大となる値を気圧面毎に算定する。そして、このように算定した各気圧面、各継続時間の最大水蒸気フラックスと12, 24, 72時間雨量との相関について検討を行い、最も相関の高い水蒸気フラックスの気圧面と継続時間を決定する。

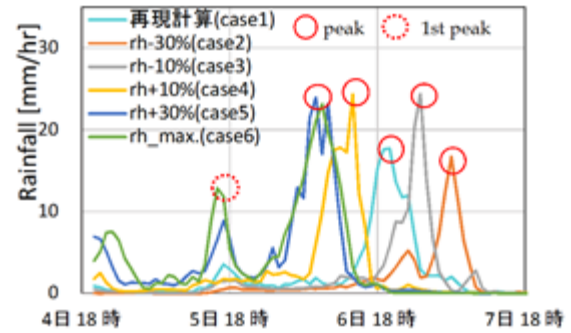
次に、WRFを用いた6豪雨の再現計算結果において、先に求めた雨量と最も相関が高い気圧面、継続時間内の平均水蒸気フラックスが最大となる同じ時間帯を対象に、2013年に公開されたJRA55再解析データにおける地上データから継続時間内の平均水蒸気フラックスを算定し、当該気圧面での値との相関式を作成する。そして、この相関式を用いて、前橋気象官署の1901年～2013年の113年間の地上観測値から得られた水蒸気フラックスの既往最大値を、相関の高い気圧面相当の値に変換した。そして、その値をもとに、先に求めた継続時間毎の最大水蒸気フラックスと雨量の関係式からPMPの算定を行う。

気候変動を考慮したPMPは、まず、前橋地点に相当する位置における気候変動予測値から最大となる水蒸気フラックスを算定する。このときの気候変動予測値には、2015年6月に公開された「環境省 気候変動モデル予測データ」の出力値を用いた。さらに、算定された水蒸気フラックスを用い、現況を対象にしたWRFの計算結果より作成した雨量と水蒸気フラックスの関係式を用いて気候変動を考慮したPMPの推定を行う。さらに、気候変動予測値には将来の降雨データも出力されており、このデータから気候変動を考慮した雨量も考慮して最大値を設定する。

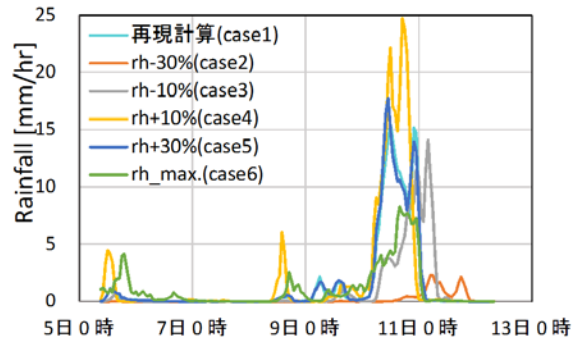
(5) PMP の時空間分布の推定手法

a) 時間分布の推定手法

先の手法により、12, 24, 72時間に対応するPMPが算定される。これらの値に合うように雨量の時間分布を設定する。ただし、これらを算定した時の最大水蒸気フラックスが発生しているのは同じ現象に対してではないが、



(a) 豪雨6(台風)



(b) 豪雨2 (台風+前線)

図-3 相対湿度の変化が降雨成因毎の時間分布に与える影響

可能最大としての組み合わせとして設定する。

また、降雨継続時間毎の引き伸ばしを行う対象となる波形は、降雨成因毎の相対湿度の増加に対する時間分布の変化を踏まえて設定するものとした。

b) 地域分布の設定方法

八斗島上流の地域を烏神流流域、吾妻川流域、奥利根流域の3流域に分割して検討する。3分割流域ごとに把握された前橋地点における水蒸気フラックスと降雨量の関係から設定する。

(6) PMF の推定手法

利根川の河川整備基本方針における貯留関数法⁵⁾による流出計算モデルと流出定数を用いて流出計算を行い、現況、および気候変動考慮のPMFを算定する。計算ケースは継続時間のPMPを踏まえ、時空間分布の違いを変化させた検討を対象6豪雨について行った。

4. 気象条件の変化が豪雨の時間分布に与える影響

(1) 相対湿度の時間分布に与える影響

降雨成因毎の相対湿度の変化による時間分布の変化を、検討対象6豪雨について把握した³⁾。前線を伴わない台風性豪雨(豪雨6)と前線を伴う台風(豪雨2)の時系列変化を図-3に示す。前線を伴わない台風では相対湿度の増加に対して、降雨量だけでなく降雨ピークの発生時刻が早くなること、および、降雨全体のピークの前に2つめピークの付加などの時間分布に影響を与えていることが

表-3 各継続時間雨量に対して最も相関係数の高い水蒸気フラックスの気圧と継続時間（直線近似）

対象豪雨	流域	最大12時間降雨量			最大24時間降雨量			最大72時間降雨量		
		相関係数	気圧面	継続時間	相関係数	気圧面	継続時間	相関係数	気圧面	継続時間
6豪雨	八斗島	0.856	550hPa	12hr	0.829	500hPa	12hr	0.819	550hPa	24hr
	烏神流	0.822	750hPa	36hr	0.792	750hPa	36hr	0.840	500hPa	24hr
	吾妻川	0.740	800hPa	48hr	0.691	550hPa	24hr	0.771	550hPa	24hr
	奥利根	0.779	800hPa	36hr	0.759	750hPa	36hr	0.787	550hPa	24hr

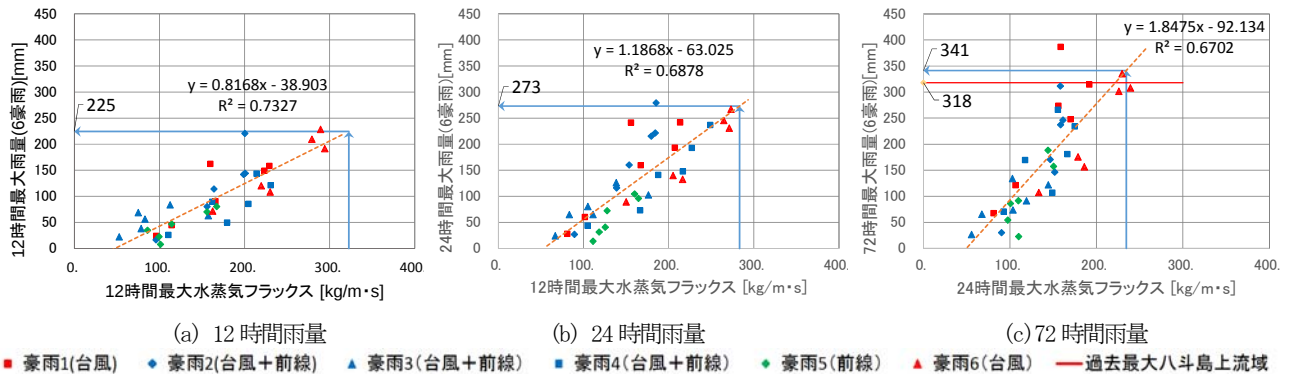


図-4 水蒸気フラックスと継続時間毎の八斗島上流域平均雨量の関係

分かる。特に、相対湿度を最大化したケース6では、豪雨1、豪雨6とも一連降雨の主要部の前半に図中の破線で示す10mm/h以上のピークを示す1山目の降雨が発生した。

一方、前線を伴う台風である豪雨2、3、4に関しては相対湿度により雨量が変化しているが、台風性豪雨のようにピーク発生位置の変化や第2ピークの顕著な発生はなく、相対湿度に対する雨量の増加率も台風性降雨に比べて小さかった。前線性豪雨5に関しては、再現計算結果からの相対湿度の増加に対して最大72時間雨量は増加せず、時間分布の変化も不規則であった。

また台風性豪雨は、大気場を変更したケースにおいて強い降水の生じている場所に変化は見られず、相対湿度が増加するほど降雨強度が大きくなっていた。

(2) 雨量と水蒸気フラックスの関係

八斗島上流域における12、24、72時間最大雨量に対して最も相関が高くなった水蒸気フラックスの気圧面と継続時間を表-3に示す。どの組合せにおいても概ね相関係数0.8以上の高い相関が得られた。また、6豪雨全てを対象とした場合は、500～550hPaの12～24時間との相関が高いことがわかる。

降雨成因毎にみると、台風性豪雨1、6を対象とした場合は800hPa～850hPaにおける24～36時間、台風+前線の場合は12時間雨量に対しては750hPaにおける36時間、24時間および72時間雨量に対しては550hPaにおける12時間が相関が高いことが分かった。さらに、前線性の豪雨5に対しては、前線帯が形成される範囲の上層である500hPa～600hPaにおける¹⁰⁾相関が高く、12時間雨量に対しては600hPaにおける36時間、24時間雨量に対して

は500hPaにおける3時間、72時間雨量に対しては500hPaにおける24時間との相関が高いことが分かった。台風性豪雨に関して低い気圧面との相関が高くなるのは、水蒸気フラックスの流入による地形性降雨が卓越するため高度が1500m程度の気圧面である850hPa面における現象との相関が高いためであると考えられる。

また、橋本らの客観解析データを用いた台風性豪雨の検討では850hPaにおける継続時間12時間の水蒸気フラックスとの相関が高かったが⁴⁾、今回、気象条件を変化させることにより降雨の主要部分の継続時間が長くなっていることや豪雨6より継続時間の長い豪雨1を含めて検討を行ったことで、相関の高い水蒸気フラックスの継続時間も長くなったと考えられる。このことは、対象流域の主要洪水の降雨成因と流域規模に応じて検討を行う必要があることを示唆している。すなわち、相関が高い気圧面に関しては降雨成因に応じて一般性があるものと考えられるが、継続時間に関しては対象流域の降雨継続時間に応じて異なると考えられる。

ここで、12時間、24時間、および72時間雨量について、表-3に示した6豪雨全体を対象とした最も相関の高い水蒸気フラックスとの関係を図-4に示す（図中の青線については後述する）。図中には、6豪雨の相対湿度を変化させた6ケースのWRFを用いた36個（6豪雨×6ケース）の計算結果とともに相関式を示している。36個の計算結果の72時間雨量最大値は386mmとなっており、八斗島上流域における過去最大値であるカスリン台風時（1947）の3日雨量である318mmを上回る雨量が発生している。

次に、八斗島流域内の分割流域である烏神流流域、吾妻川流域、および奥利根流域における最も相関の高い水

蒸気フラックスとの関係を調べた。八斗島流域全体の場合と傾向は大きく変わらないが、12 時間、24 時間では 850hPa～700hPa の相関が高くなる傾向があり、短時間では台風の地形性降雨の影響が大きいものと考えられる。

5. PMP と時空間分布の推定

(1) 過去最大水蒸気フラックスの評価

6 豪雨を対象とした場合の 72 時間雨量で最も相関の高い水蒸気フラックスである 550hPa 気圧面での 24 時間最大水蒸気フラックスと、前橋気象官署における地上観測値から算定された水蒸気フラックスとの関係式を図-5 に示す。同様に、地上との関係式を 12 時間雨量、および 24 時間雨量に対して最も相関の高い水蒸気フラックスに対して作成した。

図-5 の関係式から、前橋気象官署の年最大 24 時間水蒸気フラックスを補正して 550hPa 相当値を推定した結果を図-6 に示す。過去最大値は、1907 年 8 月(明治 40 年 8 月)の関東で既往最大クラスの洪水となった台風 12 号時の 234.6 kg/m・s であった。同様な方法を用いて 12 時間雨量、および 24 時間雨量に対する過去最大の水蒸気フラックスを求めると、それぞれ 283.3kg/m・s、322.5kg/m・s となった。

(2) PMP の評価

図-6 に示した過去最大の水蒸気フラックスから推定される最大雨量を図-4 に青線に示した。72 時間雨量において、地上観測値から算定した過去最大の水蒸気フラックスを 550hPa 相当に変換した値 234.6kg/m・s から推定した最大雨量は図-4(c)に示す 341mm となり、カスリン台風時の雨量を越える規模となった。

6 豪雨を対象とした 12、24、72 時間の継続時間毎に、検討対象 6 豪雨の実績最大値、WRF を用いた 36 個の計算結果の最大値、および過去最大の水蒸気フラックスから推定した最大値の比較を表-4 に示す。この結果から、降雨継続時間が短いほど実績最大降雨量に対する最大降雨量の比率が大きくなっていることがわかる。WRF 計算値に対しては 1.49 倍～2.08 倍、過去最大水蒸気フラックスからの推定においては 1.32 倍～2.05 倍となっている。この結果は小林ら²⁾らの淀川流域における実績最大雨量に対する最大化した雨量の倍率 1.5 倍と同程度の値である。また、降雨継続時間が短いほうが比率が大きくなっており、集中度の高い豪雨となることが分かる。また、気候変動を考慮した PMP は 449mm/72hr となった。

(3) PMP の時空間分布の評価

PMP の時間分布を設定するにあたり、波形については降雨継続時間の短い時間帯を先取りして作成した。具体

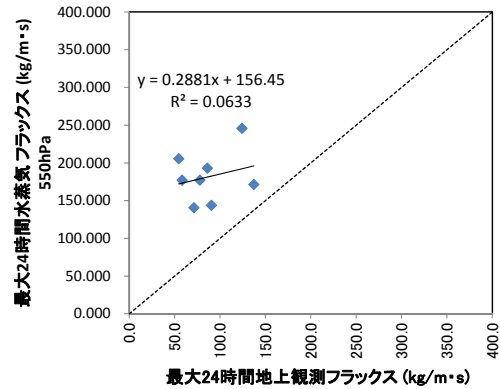


図-5 72 時間雨量と相関の高い水蒸気フラックス(550hPa, 24 時間)と地上観測からの水蒸気フラックスの関係

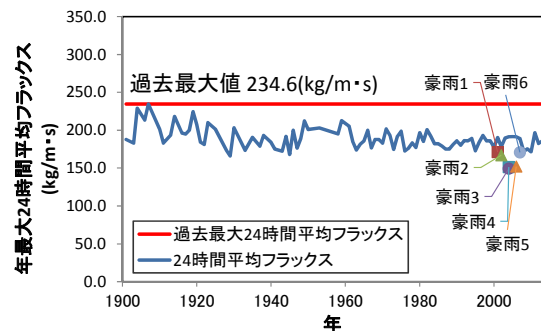


図-6 前橋地点における年最大 24 時間水蒸気フラックスの経年変化

的には、12 時間雨量に対して 225mm となるように引伸ばしを行い、24 時間の引き伸ばしは最大 12 時間を除く 12 時間の引き伸ばしが 273mm となるように降雨波形を作成した。降雨成因毎の時間分布の設定として、図-3 に示したように前線を伴わない台風性豪雨に関しては、ピーク発生時刻、前期に 2 山目が発生することを考慮して時間分布を設定する。前線を伴う台風、および前線性豪雨に関しては相対湿度の変化に対して時間分布の変化はみられない。このため、実績降雨時間分布に対して降雨分布を変化させるものとした。そのような時間分布波形を作成したうえで空間分布に関しては各分割流域において PMP となるような降雨波形とした。

また、72 時間雨量 PMP である 72 時間雨量 341mm が同じでも時間分布の違いが流量に与える影響を検討するため、72 時間雨量 PMP に対して一律で引き伸ばす時間分布(パターン 1)、実績降雨波形に対して降雨時間時間 12、24、72 時間に対して引き伸ばした時間分布(パターン 2)、前線を伴わない台風性豪雨に対して相対湿度 100% の WRF 計算結果(ケース 6)の時間分布に対して降雨継続時間毎の引き伸ばしを行った時間分布(パターン 3)、およびパターン 2、あるいはパターン 3 の時間分布について 72 時間雨量の地域分布を考慮した波形(パターン 4)を作成し時空間分布の違いが流量に与える影響を評価できる時空間分布を作成した。

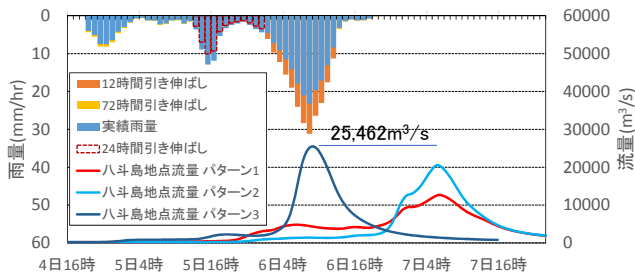


図-7 PMF の推定結果

6. PMF の推定

(1) 現況における PMF

6 豪雨を対象とした流出計算結果から、相対湿度の変化による時間分布の変化を考慮し、12、24、72 時間の降雨継続時間毎に PMP に引き伸ばしを行ったパターン 3 において、八斗島地点のピーク流量が最大の約 26,000m³/s となった。これは、利根川河川整備基本方針における基本高水のピーク流量である 22,000m³/s 以上である。

また、72 時間雨量が同じであっても継続時間毎の最大化を行う場合は、パターン 1 とパターン 2 で約 7,000m³/s の違いがあった。また、パターン 2 とパターン 3 のピーク流量の差から、降雨継続時間毎の雨量がそれぞれ同じであっても降雨波形の違いによって約 5,000m³/s の違いが生じることが分かった。

(2) 気候変動を考慮した PMF

気候変動を考慮した PMP である 449mm に 72 時間雨量を引き伸ばした場合の各豪雨の八斗島地点ピーク流量を求めた結果、6 豪雨中 3 豪雨が 22,000m³/s 以上の流量となり、その中でも豪雨 4 が最大の約 34,000m³/s となった。これは、現況の可能最大洪水より 8,000m³/s 程度大きな流量となっている。

7. まとめと今後の課題

本論文では、日本の直轄河川流域に適用性の高い PMP の算定を目指して、気象モデル WRF を用い、近年発生した台風性、前線性の 6 豪雨を対象に相対湿度を変化させ、利根川上流域における降雨の時空間分布に与える気象パラメータの影響を考察し、PMP と PMF の推定を試みた。その結果、以下のことを明らかにした。

- 1) 相対湿度は総雨量の変化だけでなく降雨の時間分布に影響を与えることが分かった。特に、台風性豪雨では相対湿度の増加は、降雨の発生時刻を早くするとともに、一連降雨の前半に新たな降雨ピークを発生させることがあることが分かった。これは降雨の初期損失に影響を与え、降雨ピーク時の流出が大きくなるため、河川計画には重要な影響であると考えられる。
- 2) 12、24、72 時間雨量は 500～550hPa の気圧面におけ

表-4 検討対象豪雨の 実績最大雨量と WRF 計算値および過去最大水蒸気フラックスからの雨量の比較

最大降雨量	八斗島上流域平均降雨量 (mm)		
	12時間	24時間	72時間
実績最大降雨量 (豪雨6: 台風性)	110.0	149.9	258.3
①WRF計算結果の最大降雨量 (6豪雨×6ケース=36個)	228.5	279.2	386.0
②過去最大フラックスから推定した最大降雨量	225.0	273.0	341.0
①と実績最大値の比率	2.08	1.86	1.49
②と実績最大値の比率	2.05	1.82	1.32

る 12～24 時間最大水蒸気フラックスとの相関が高いことを示した。このため水蒸気フラックスは降雨継続時間毎の最大雨量を推定することのできる有効な指標であることがわかった。

- 3) 降雨量と相関の高い水蒸気フラックスと前橋気象官署における地上観測値との関係式から過去最大水蒸気フラックス算定する手法を示した。その結果を用い PMP と時空間分布の推定を行った。

- 4) 複数洪水を対象とした流出計算により PMF を算定する手法を明らかにした。また、PMF は河川整備基本方針のピーク流量を上回る可能性があることを示した。

今後の課題は以下のとおりである。

- ・利根川流域以外の流域規模、地形条件、主要な降雨成因の異なる流域においても、PMP および PMF の推定について検討を行う必要がある。
- ・JRA-55 再解析データ、気候変動予測値等を用いた対象流域の主要豪雨、気候変動予測値について気象モデルを用いた PMP の推定を行う必要がある。
- ・台風経路を変化させるなど面的な条件変化も踏まえた最大化の検討を行う必要がある。

謝辞: 本研究において用いた気候変動予測値は、利用したデータセットは、国家基幹技術「海洋地球観測探査システム」：データ統合・解析システム(DIAS) の枠組みの下で収集・提供されたものである。ここに、記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 気候変動適応研究本部：気候変動適応策に関する研究(中間報告)、国総研資料749号、pp. II-112～13、平成25年8月。
- 2) 小林健一郎・奥勇一郎・寶馨・石川裕彦・竹見哲也・中北英一：物理的ダウンスケール法による極端台風を用いた淀川流域の洪水評価、京都大学防災研究所年報、第55号B、pp. 9-14、2012。
- 3) 橋本健・矢島啓：利根川上流域を対象とした水蒸気フラックスの最大化による可能最大降水量(PMP)の推定、土木学会論文集B1(水工学)、Vol171, No4, pp. I_487-I_492、2015年2月
- 4) 吉崎正憲・加藤輝之：豪雨・豪雪の気象学、朝倉書店、pp. 72-76、2007。
- 5) 日本学術会議：河川流出モデル・基本高水の検証に関する学術的な評価、2011。