気象条件の最大化による可能最大降水量(PMP)と可能最大洪水(PMF)の推定

橋本 健^{1)†} 矢島 啓²⁾

1) パシフィックコンサルタンツ株式会社 河川部
(〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3-22)

2) 島根大学 研究・学術情報機構 エスチュアリー研究センター
(〒690-8504 松江市西川津町1060)

†連絡先著者 (Corresponding Author) E-mail: ken.hashimoto@ss.pacific.co.jp

2011年の台風12号, 2015年9月の鬼怒川が決壊し甚大な被害を与えた災害など, 近年, 豪雨災害が多発している。また, 気候変動により洪水時の降水量, 流量はさらに増加することが予測されている。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」に対応し「気候変動」を考慮した可能最大降水量(PMP)の推定, およびそれから算出される可能最大洪水(PMF)の推定を目指したものである。特に本研究では, 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している。本研究における主な結果は以下のとおりである。(1) 水蒸気フラックスは降雨継続時間毎, 地域毎の降雨量との相関は高く, PMPの推定に有効な指標である。(2) 過去の実績値, および気候変動予測値を用いた水蒸気フラックスの長期データからPMPを算定する手法を示した。(3) 降雨成因毎のPMPの時間分布の作成方法, および降雨継続時間毎の時空間分布の作成手法を示した。(4) 複数洪水を対象とした流出計算により可能最大洪水(PMF)を算定する手法を明らかにした。

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, 気候変動

I. はじめに

2011年9月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, 2015年9月の鬼怒川が決壊し甚大な被害を与えた災害等, 巨大台風等に伴う大規模な災害が近年頻発・激甚化している。また, 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(国土技術政策総合研究所, 2013)。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。想定最大外力に関しては, 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「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(国土交通省 水管理・保全局, 2015a), 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。2015年8月には「水災害分野における気候変動適応策のあり方について」が答申され(社会資本整備審議会 河川分科会, 2015), 「想定し得る最大規模の外力」を設定し被害を軽減する対策を進める必要があるとしている。想定最大外力の技術的な設定手法としては2015年7月に「水防法等の一部を改正する法律」の一部施行に伴い「浸水想定(洪水, 内水)の作成等のための想定最大外力の設定手法」(国土交通省 水管理・保全局, 2015b)が公表されている。

このような背景を踏まえ, 国内河川の「流域規模」と「降雨継続時間」に対応した可能最大降水量(PMP)の推定, およびそれから算出される可能最

大洪水 (Probable Maximum Flood : PMF) を今後の「気候変動」の影響も考慮して推定する必要性が高い。これまでのPMPの推定に関しては、国土交通省水管理・保全局 (2015b) のDAD解析結果を用いる方法、および気象要素として相対湿度、風速、可降水量等を指標として降雨量を推定する方法等が「Ⅱ. 従来の研究」に示すように多く行われてきた。これに対して、橋本・矢島 (2015) は利根川流域の八斗島基準地点上流域を対象とした検討を行い、河川計画の対象とする降雨継続時間の流域平均雨量はある気圧面における水蒸気フラックスとの相関が高いことを示した。さらに、過去の長期データから基準地点上流域を対象としたPMPを推定した。しかしながら、サブ流域の降雨特性を踏まえた時空間分布の設定や気候変動を考慮したPMP、およびPMFの推定は行われていない。

以上を踏まえ、本論文では降雨の時空間分布を考慮し、「現況」だけでなく「気候変動」を考慮したPMP、およびPMFの推定を目指す。特に本論文では、気象モデル Weather Research and Forecasting (WRF) を用いて、適切な指標と降水量の関係を治水基準地点上流域だけでなくそのサブ流域においても把握する。その結果から、サブ流域毎のPMPの推定、およびその時空間分布のパターンを複数考慮した想定最大外力としてのPMFの推定方法を新たに検討する。この理由は、河川計画や危機管理計画において河道断面や浸水状況等を決定する直接の外力は流量であり、流量の最大値は降雨量、降雨の時間分布、および降雨の地域分布による影響が大きい。そのため複数の時空間分布パターンにおける最大値の評価が重要であると考えたためである。さらに、本論文において推定するPMPとDAD式により算出されるPMP (国土交通省水管理・保全局, 2015b) の比較を行い、本手法の有用性について考察する。

Ⅱ. 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。これらの既往研究の課題について以下に説明する。

1) 統計的な方法

統計的な方法にはHershfield (1961) の方法など

があるが、過去の最大雨量に対する係数の設定により推定する方法であり可能最大降雨として設定することが困難である。

2) DAD解析結果を用いる方法

ある地域内において発生した雨量が同じ地域のどこでも発生するとしたDAD解析を用いる方法には桑原 (1986) の方法、国土交通省水管理・保全局 (2015b) の「最大規模の降雨に関する基準」などがある。国土交通省の方法は日本を15の地域に区分し近隣の河川等における降雨が当該河川でも発生するとした方法である。このような方法は流域面積のみで降雨量が設定されるため流域の標高、斜面の向きなどの降雨量に影響を与える地形条件の違いを反映することができない。また、想定最大降雨波形への引き伸ばしは計画降雨継続時間内で実績降雨波形を一律に引き伸ばす方法が採用されている。さらに、実績降雨の最大包絡に基づいたDAD式であり、本論文において目指す気候変動の影響は考慮されていない。

3) 気象条件を最大化する方法

降雨量と相関が高いと考えられる気象条件を最大化することによりPMPを推定する代表的な方法としてWorld Meteorological Organization (WMO) (2009) の可降水量 ((1) 式参照) を指標とした方法がある。これは、指標とする可降水量の変化率が降雨量の変化率であるとして関係式を作成し、その関係式を用いて過去最大可降水量に対応した降雨量を可能最大降水量とする考え方である。ただしこの方法は、大気のプロファイルを算定する際に偽湿潤断熱過程を用いるとともに、可降水量の増加に対してPMPが同じ割合で増加するという単純な線形関係として降雨現象を簡素化した物理メカニズムとして取り扱っているという問題がある。

$$P_{\max} \left(\frac{PW_{\max}}{PW} \right) \times P \quad (1)$$

ここで、 $P_{\max}$: 可能最大降水量 (mm), $PW_{\max}$: 過去最大12時間持続最大可降水量 (mm), PW : 豪雨時の12時間持続最大可降水量 (mm), P : 豪雨時の降水量 (mm) である。さらに、可降水量を用いて評価を行うことは水蒸気の継続的な供給を評価する指標ではないため、日本の直轄河川において対象となる1~3日間の降雨継続時間内雨量を評価する際に指標として適切ではないと考えられる。これに対し

て、橋本・矢島・細川（2013）は利根川流域を対象として気象庁メソ客観解析データを用い、(2)式に示す水蒸気フラックスが可降水量に対して降雨量との相関が高く、特に降雨継続時間が2～3日と長くなると相関が高くなることを示している。

$$Fq = V \cdot q \quad (2)$$

ここに、 Fq ：水蒸気フラックス ($\text{kg/kg} \cdot \text{m/s}$)、 V ：風速 (m/s)、 q ：水蒸気混合比 (kg/kg) である。

4) 気象モデルを用いた方法

気象モデルを用い指標と降雨量の物理的な関係からPMPを推定する方法に関しては、RAMSを用いたAbbs (1999)の方法、MM5を用いたChen (2005)、およびIshida *et al.* (2015)の方法、領域気象モデルWRFを用いたTan (2010)の方法などがある。しかしながら、これらの気象モデルを用いた研究はWMOのPMP推定手法と同様に、可降水量や相対湿度、風速等の気象要素と雨量の関係を把握する方法である。このため、降雨継続時間が1～3日間と長く山地流域を有する複雑な日本の地形条件で水蒸気フラックスを用いた評価が必要であり、適用には問題があることが予想される。さらに、算定されたPMPの時空間分布のパターンを設定した既存の研究は見当たらない。加えて、気候変動を考慮したPMPの推定に関しては、Tan (2010)が計算モデル上で気温上昇を考慮した検討を行っている程度で、近年公開されている気候変動予測値を用いて不確実性を考慮した検討は行われていない。日本の河川流域を対象として気象モデルを用いた研究としては次の2つがあげられる。小林ら (2012)は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を目的としていない。一方、橋本・矢島 (2015)は、利根川上流域を対象とし、WRFを用いて2001年～2007年の6豪雨を対象として気象条件を変化させた検討を行った。その結果、八斗島上流域において、12, 24, 72時間雨量は500～550 hPaの気圧面における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。さらに、過去の長期データから基準地点上流域におけるPMPを推定した。

III. 気象モデルを用いたPMPとPMFの算定手法

1. 豪雨の雨量評価と検討対象豪雨

本論文では、図-1に示す利根川八斗島基準地点上流域（流域面積5,114 km^2 ）とそのサブ流域である鳥・神流川流域、吾妻川流域、および奥利根流域を対象とする。各サブ流域の流域面積はそれぞれ1,703 km^2 , 1,739 km^2 および、1,667 km^2 と概ね同程度の規模となっている。PMPを推定する降雨継続時間は、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時間雨量に対しても評価する。

気象モデルを用いた検討は、表-1に示す6豪雨を対象とした。この選定にあたっては、メソ客観解析データ（時間間隔：豪雨1～4は6時間、豪雨5,6は3時間、水平解像度：10 km、鉛直解像度：風、

図-1 利根川流域図

Fig. 1 Map of the Tone River Basin.

表-1 検討対象豪雨

Table 1 Rainfall events.

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

気温が20層、相対湿度が11層)の取得が可能な2001年から2011年において欠測の無い豪雨を対象とした。6豪雨は国土交通省解析雨量(時間間隔:豪雨1, 2は1時間, 豪雨3~6は30分, 水平解像度:豪雨1~4は2.5 km, 豪雨5, 6は1 km)を用いた八斗島上流域平均72時間雨量が概ね100 mm以上, および八斗島流量観測所における実績時間最大流量が2,000 m³/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, 八斗島上流域において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号である。

次に降雨の地域分布特性を調べるために, 各サブ流域において6豪雨の中で最大となっている12, 24, 72時間雨量と八斗島上流域の最大雨量(豪雨6)との比率を表-2に示す。烏・神流川流域では豪雨6が最大雨量となっており, 八斗島上流域に対して1.39倍~1.48倍の雨量となっている。これに対して吾妻川流域および奥利根流域の雨量は八斗島上流域に対して0.81~0.94倍となっており, 降雨成因は豪雨2, 豪雨5などの前線の影響を受けている降雨が最大となる継続時間も見られる。このようにサブ流域ごとに異なった分布特性を持つことが明らかであり, PMPの推定にもこれらを考慮する必要がある。

2. 計算モデルと計算条件

本論文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は米国国立気研究センター(NCAR: National Center for Atmospheric Research), 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(16 km 格

子), 第2領域(4 km 格子), 利根川流域を含む第3領域は1 km 格子の3重ネステイングを1-wayで行った。また鉛直方向には地表面と気圧面26層(1,000, 975, 950, 925, 900, 850, 800, 750, 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 hPa)の合計27層で行った。

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, 境界条件には米国環境予報センター(NCEP: National Centers for Environmental Prediction)の最終解析値(FNL: Final)(6時間間隔, 水平解像度1°, 鉛直層は地表面と気圧面26層)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50 m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けた上で96時間の計算を行い, その計算時間内で八斗島上流域の平均72時間雨量が最大となる72時間を対象に評価を行った。なお, 助走期間は24, 36, 48, 72, 96時間と5ケース変化させた場合の八斗島上流域における流域平均雨量の時系列を検討対象豪雨について比較し72時間以上の助走期間の範囲で雨量の算定結果が大きく変化しないことから72時間とした。また, 計算過程においてデータ同化は行っていない。WRFの計算に用いる物理過程オプションは今回の対象とした豪雨の再現精度がもっとも高い結果となった条件として, 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を用いてすべての計算を行った。なお, WRFを用いた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, およびピーク発生時刻などについて実績雨量との再現性を確認し

表-2 対象流域毎の実績最大流域平均雨量の比較

Table 2 Maximum observed rainfall for each basin.

対象流域	流域平均降雨量 (mm)			最大降雨量となった豪雨
	12hr	24hr	72hr	
八斗島流域	110.0	149.9	258.3	豪雨6
烏・神流川流域	153.3 (1.39)	216.3 (1.44)	382 (1.48)	豪雨6
吾妻川流域	97.3 (0.88)	140 (0.93)	238.8 (0.92)	12, 72時間雨量: 豪雨6 24時間雨量: 豪雨5
奥利根流域	97.1 (0.88)	141.5 (0.94)	208 (0.81)	12, 24時間雨量: 豪雨2 72時間雨量: 豪雨5

() 内は八斗島流域平均雨量に対する比率

図-2 WRF計算領域図

Fig. 2 Simulated regions for WRF model run.

図-3 WRFを用いた検討対象6豪雨に対する最大72時間雨量と最大時間雨量の再現性
Fig. 3 Reproducibility of WRF model with maximum 72-hr and 1-hr rainfall for six studied rainfall events.

ている（橋本・矢島, 2015）。ここではサブ流域である烏・神流川流域、吾妻川流域および奥利根流域における豪雨の再現性について八斗島流域における雨量の再現性と合わせて図-3に示すが流域平均72時間雨量、最大時間雨量の再現計算雨量/実績雨量は0.8～2.0倍の範囲にあることが分かった。

3. 気象条件変化の検討方法

PMPの推定に用いる指標である水蒸気フラックスが降雨の時空間分布に与える影響の評価は、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-3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）、および大気上端までの全層で100%とする（ケース2～6）合計6ケースを設定した。ただし、相対湿度の値は絶対値（例えば、10%を加えるでは60%を70%）として変化させ、また、各ケースに

表-3 WRFにおける気象条件の検討ケース
Table 3 Relative humidity changes based on observed data for WRF model run.

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%	相対湿度を増加
5		+30%	
6		最大化	大気上端までの全層の相対湿度を100%

における相対湿度の最小値は0%、最大値は100%とした。

4. PMPの推定手法

1) 雨量と水蒸気フラックスの関係把握手法

水蒸気フラックスの評価地点は前橋気象官署地点に最も近いWRFの計算格子点とした。これは、八斗島上流域における流域平均水蒸気フラックスは前橋気象官署地点における値と相関が高いことが確認

されているためである(橋本・矢島・細川(2013))。水蒸気フラックスの算定は、WRFを用いた1時間毎の計算出力値から、1,000～300 hPaの各気圧面において水蒸気混合比に風速を乗じて計算する。その結果から、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。これらの算定結果から、12, 24, 72時間雨量と特定の気圧面・継続時間を対象にした最大水蒸気フラックスの線形回帰式を八斗島基準地点上流域とそのサブ流域について作成する。

2) 現況PMPの推定手法

現況PMPは、過去最大の水蒸気フラックスを1)で作成した水蒸気フラックスと雨量の回帰式に与えて算定する。過去最大水蒸気フラックスは回帰式に用いられている気圧面の値とする必要があるが、気象庁メソ客観解析2001年以降のデータであるため対象期間が15年程度に限定される。このため、前橋気象官署の地上観測値を気圧面相当の値に変換することにより、地上観測値の時間データが得られる1901年～2013年の113年間のデータを対象とした。地上観測値を用いた気圧面相当の値への変換には、JRA55再解析データの出力結果(時間解像度は6時間間隔、水平解像度1.25°, 鉛直層数: 60層)が得られる1958年～2013年の期間において気圧面における最大水蒸気フラックスと地上観測値から算定される最大水蒸気フラックスの線形回帰式を継続時間毎に作成することにより行った。線形回帰式の作成に用いるデータは過去の災害記録(国土交通省 水管理・保全局, 2006)から利根川流域に浸水被害が発生している主要豪雨を抽出する。次に、災害記録に記載されている主要豪雨の八斗島上流流域平均3日雨量から災害発生の閾値を設定し閾値以上の雨量となる豪雨を対象とした。113年間のデータを1958年以降の限定された豪雨時のデータからなる一つの関係式で全て推定することには課題があるが、可能最大規模の観点からはできるだけ過去の主要豪雨に遡った評価を行うために観測期間の長い地上観測値を活用し、上層気圧面のデータが得られる最大範囲で災害発生規模の豪雨データを用いて推定する方法を採用した。

3) 気候変動を考慮したPMPの推定手法

気候変動を考慮した水蒸気フラックスは、次に述べる気候変動予測値の気象要素の出力結果から前橋

気象官署地点に最も近い格子点において算定する。将来気候として出力されたケースから最大となる水蒸気フラックスを1)で作成した降雨量との回帰式に与えて気候変動を考慮したPMPを推定する。ここで、検討に用いる気候変動予測値は2015年6月に公開された「環境省地域気候変動モデル予測データ」の出力値を用いた。本出力値は全球気候モデル(MRI-AGCM3.2H: 水平格子間隔60 km, 鉛直層数64層)の値を日本周辺の境界条件として計算された地域気候モデル(MRI-NHRCM20: 水平格子間隔20 km, 時間解像度は1時間, 鉛直層数40層)の計算結果である。なお、出力期間は、現在気候:1984年9月～2004年8月、将来域候:2080年9月～2100年8月となっている。これらの予測データを用いた理由は以下の3点である。(1)時間解像度を有する出力があること。(2)排出量の影響が最も大きいRCP8.5シナリオの出力があること。(3)積雲対流スキーム3ケース(Yoshimura Scheme (YS), Kain-Fritsch Scheme (KF), Arakawa-Schubert Scheme (AS))に対してそれぞれ、3つの海面水温のパターンSST1, SST2, SST3の組み合わせから9ケースについて20年間の出力値があり不確実性を考慮した評価を行うことができること。

5. PMPの時空間分布の推定手法

1) 時間分布の推定手法

これまでの河川計画において計画降雨を作成する場合は、実績降雨に一定の倍率を乗じて計画降雨量となるように引き伸ばしが行われている。すなわち、計画降雨波形は実績降雨波形の相似形を仮定して作成されている。しかしながら、想定最大外力としての時間分布の設定には、気象条件の変化に対応した時間分布の変化、降雨継続時間毎の降雨量の最大化などを踏まえ流量に与える影響を評価する必要がある。

以上の観点からPMPの時間分布は、以下の2点を踏まえて設定を行う。1点目は、気象条件の変化に対応する雨量の時間分布の変化を考慮したことである。すなわち、WRFを用いた計算結果から雨量の時間分布と水蒸気フラックスとの関係を把握し、PMPの算定に用いる最大水蒸気フラックスに対応した時間分布を与える。2点目は、降雨継続時間毎の雨量の最大化である。ここでは、継続時間72時間における雨量をPMPとするだけでなく、継続時間が12時間、および24時間雨量についてもPMPとなるように3期間の継続時間内雨量が最大となる時間分布を

作成する。3期間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とは限らないが、可能最大としての組み合わせとして設定する。

2) 地域分布の推定手法

八斗島上流域のサブ流域である烏・神流川流域、吾妻川流域、および奥利根流域について八斗島上流域と同様な方法で現況および気候変動を考慮したPMPとその時間分布の推定を行う。この結果から、サブ流域毎のPMPの違いを考察するとともに、八斗島上流域において降雨の引き伸ばし倍率が地域ごとに異なる外力についても考慮して流量に与える影響を検討する。

3) PMPの時空間分布の設定ケース

PMPの時空間分布の違いが流量に与える影響を検討するため、以下の4パターンの時空間分布を作成した。パターン1～3は時間分布の設定が流量に与える影響を把握するためのケースである。パターン1は八斗島上流域実績雨量を72時間雨量PMPに対して一律で引き伸ばすこれまでの河川計画で通常用いられている降雨波形作成方法（たとえば国土交通省水管理・保全局, 2015b）である。パターン2は、実績降雨波形を降雨継続時間12, 24, 72時間に対してそれぞれの時間帯のPMPに引き伸ばした時間分布であ

る。パターン3は、気象条件の変化に対する時間分布の変化と降雨継続時間毎の引き伸ばしを行った時間分布であり、先に時間分布の推定で述べた2点を考慮したケースである。さらに、先の地域分布の推定手法で述べたサブ流域毎の降雨波形を与える方法をパターン4として4パターンの時空間分布を作成する。

6. PMFの推定手法

PMFは検討対象6洪水について、それぞれパターン1～4のPMPとその時空間分布を与えて流出計算により流量を算定する。これら4パターンの流出計算結果から、ピーク流量の最大値をPMFとする。以上の計算に用いる流出計算手法は貯留関数法とし、利根川の基本高水の算定に用いられているモデル、パラメータ（日本学術会議, 2011）を用いた。有効雨量、流域定数、および河道定数等のパラメータは八斗島地点の流量が $5,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上となっている8洪水の再現性から設定されている。貯留関数法のモデル、各パラメータの特徴としては以下のとおりである。流域分割は図-4に示すように八斗島基準点上流域を39流域に分割し各流域に有効雨量と流域定数、および開始基底流量を与えている。各流域における定数を表-4に示す。有効雨量は木村の貯留関数法などで用いられている流域を流出域と浸透域に

図-4 八斗島上流域における流域分割図, および流出計算モデル図

Fig. 4 Watershed and run-off model over the Yattajima Basin.

表-4 PMF算定の流出計算に用いた流域定数と河道定数

Table 4 Parameters of basin and river channels of the run-off model for PMF.

(a) 流域定数										(b) 河道定数				
流域 No.	流域 面積	有効雨量				流域定数			開始 基底 流量	河道 No.	K	P	遅滞 時間	
		一次 流出率	飽和 雨量	流入 係数	初期 損失 雨量	遅滞 時間	係数							
	A (km ²)	f_i	R_{sa} (mm)	f_{sa}	R_0 (mm)	T_l (分)	K	P	Qb_1 (m ³ /s)				T_l (時間)	
奥利根流域	1	165.48	0.4	150	1.0	12.0	30	7.587	0.528	7.3	a	—	—	0.217
	2	60.59	0.4	150	1.0	12.0	50	6.252	0.656	2.7	b	—	—	0.234
	3	165.77	0.4	150	1.0	12.0	50	9.480	0.592	7.3	A	4.476	0.699	0.165
	4	103.07	0.4	150	1.0	12.0	50	9.480	0.592	4.6	B	12.030	0.665	0.350
	5	81.80	0.4	150	1.0	12.0	50	9.480	0.592	3.6	C	13.878	0.665	0.273
	6	110.19	0.4	150	1.0	12.0	40	10.591	0.655	4.9	D	7.381	0.663	0.160
	7	79.19	0.4	150	1.0	12.0	50	9.480	0.592	3.5	E	4.966	0.729	0.180
	8	226.00	0.4	150	1.0	12.0	50	9.480	0.592	10.0	F	4.831	0.797	0.250
	9	252.05	0.4	150	1.0	12.0	90	13.487	0.530	11.1	G	6.405	0.724	0.170
	10	161.64	0.4	150	1.0	12.0	90	13.487	0.530	7.1	H	6.223	0.681	0.143
	11	78.78	0.4	150	1.0	12.0	90	13.487	0.530	3.5	K	8.039	0.712	0.281
	12	182.31	0.4	150	1.0	12.0	50	9.480	0.592	8.0	O	12.928	0.627	0.208
	13	144.49	0.4	—	—	14.0	50	35.239	0.300	6.4	Q	9.401	0.727	0.509
	14	269.24	0.4	—	—	14.0	100	29.321	0.305	11.9	R	7.492	0.632	0.127
吾妻川流域	15	289.00	0.4	—	—	14.0	100	29.321	0.305	12.8	N	7.515	0.644	0.306
	16	153.20	0.4	—	—	14.0	100	29.321	0.305	6.8	I	6.235	0.742	0.318
	17	38.30	0.4	—	—	14.0	100	29.321	0.305	1.7	J	8.598	0.654	0.269
	18	164.22	0.4	—	—	14.0	50	35.239	0.300	7.2	M	1.660	0.752	0.095
	19	157.01	0.4	—	—	14.0	50	35.239	0.300	6.9	L	16.279	0.614	0.333
	20	188.37	0.4	—	—	14.0	50	35.239	0.300	8.3	P	6.775	0.684	0.268
	21	97.12	0.4	—	—	14.0	50	35.239	0.300	4.3				
	22	93.33	0.4	—	—	14.0	50	35.239	0.300	4.1				
	23	24.68	0.4	—	—	14.0	50	35.239	0.300	1.1				
	24	23.88	0.4	—	—	14.0	50	35.239	0.300	1.1				
	25	155.13	0.6	200	1.0	14.0	30	29.519	0.428	6.8				
鳥川流域	26	110.02	0.6	200	1.0	14.0	40	18.623	0.572	4.9				
	27	121.39	0.6	200	1.0	14.0	60	10.765	0.680	5.4				
	28	165.39	0.6	200	1.0	14.0	40	18.623	0.572	7.3				
	29	43.27	0.6	200	1.0	14.0	40	18.623	0.572	1.9				
	30	190.64	0.6	200	1.0	14.0	40	18.623	0.572	8.4				
	31	158.74	0.6	200	1.0	14.0	40	18.623	0.572	7.0				
	32	201.63	0.6	200	1.0	14.0	40	18.623	0.572	8.9				
	33	75.00	0.6	200	1.0	14.0	40	18.623	0.572	3.3				
	34	94.85	0.4	—	—	14.0	50	35.239	0.300	4.2				
	35	70.05	0.6	200	1.0	14.0	40	18.623	0.572	3.1				
神流川流域	36	269.56	0.6	130	1.0	22.0	80	29.976	0.476	11.9				
	37	53.25	0.6	200	1.0	22.0	80	29.976	0.476	24.0				
	38	51.68	0.6	200	1.0	22.0	80	29.976	0.476	2.3				
	39	37.50	0.6	200	1.0	22.0	80	29.976	0.476	1.7				
	5107.81									247.3				

分割する方法（いわゆるfA法）ではなく、流出率は雨量に乗ずる係数として分割流域毎に有効雨量を設定（いわゆるf_s法）している。サブ流域毎の有効雨量は、奥利根流域では一次流出率0.4、飽和雨量150 mm、吾妻川流域では一次流出率0.4、実績値の範囲で飽和しない設定、鳥川流域では一次流出率0.6、飽和雨量200 mm、神流川流域では一次流出率0.6、飽和雨量130 mmと設定されている。サブ流域毎の

流域定数は、利根川経験式に基づくK値、P値を与えている。河道の効果は、鳥・神流川、吾妻川および奥利根川においてそれぞれ河道貯留と遅滞時間を見込む河道をA～Pの18区間を、遅滞時間のみ見込む河道をa、bの2区間をモデル化している。

八斗島上流における新たな流出計算モデルで用いる貯留関数法の基礎式は（3）～（10）式のとおりである。

1) 流域の基礎式

$$\frac{ds}{dt} = f(t) \cdot r(t) - q(t + T_l) \quad (3)$$

$$s(t) = k \cdot q(t + T_l)^p \quad (4)$$

$$q(t) = \frac{3.6 \cdot Q(t)}{A} \quad (5)$$

ただし,

$$\Sigma r(t) \leq R_0 \text{ の場合, } f(t) = 0.0$$

$$R_0 < \Sigma r(t) \leq R_0 + R_{sa} \text{ の場合, } f(t) = f_1$$

$$\Sigma r(t) > R_0 + R_{sa} \text{ の場合, } f(t) = 1.0$$

ここで,

$$R_{sa} = \frac{(R_{sum} - \frac{Q_{sum}}{1000 \cdot A})}{(1 - f_1)} \quad (6)$$

また, 流域からの流出量 $Q_{ca}(t)$ は, 基底流量 $Q_b(t)$ を含めて次の式で考える.

$$Q_{ca}(t) = \frac{q(t) \cdot A}{3.6} + Q_b(t) \quad (7)$$

ここで, $s(t)$: みかけの流域貯留高 (mm), $f(t)$: 流入係数 (無次元), $r(t)$: 流域平均降雨強度 (mm/hr), $q(t)$: 直接流出高 (mm/hr), T_l : 遅滞時間 (hr), k , p : 流域による定数, $Q(t)$: 直接流出強度 (m³/s), A :

流域面積 (km²), R_0 : 初期損失雨量 (mm), R_{sa} : 飽和雨量 (mm), R_{sum} : 総降雨量 (mm), Q_{sum} : 総直接流出量 (m³), f_1 : 一次流出率 (無次元), $Q_{ca}(t)$: 流域からの流出量 (m³/s), $Q_b(t)$: 基底流量 (m³/s) である.

2) 河道の基礎式

$$S_l(t) = K \cdot Q_l(t)^p - T_l \cdot Q_l(t) \quad (8)$$

$$\frac{dS_l(t)}{dt} = l(t) - Q_l(t) \quad (9)$$

$$Q_l(t) = Q(t + T_l) \quad (10)$$

ここで, $S_l(t)$: みかけの河道貯留量 (m³/s・hr), $Q_l(t)$: 遅れ時間 T_l を考慮した流出量 (m³/s), $l(t)$: 流入量 (m³/s), T_l : 遅滞時間 (hr), K , P : 河道による定数 (無次元) である.

IV. PMPとその時空間分布の推定

1. 雨量と水蒸気フラックスの関係

図-5には, 八斗島上流域 (橋本・矢島, 2015), および本論文において検討を行った各サブ流域における72時間降雨量と水蒸気フラックスの相関がもつ

(a) 八斗島上流域

(b) 鳥・神流川流域

(c) 吾妻川流域

(d) 奥利根流域

● 豪雨1(台風) ◆ 豪雨2(台風+前線) ▲ 豪雨3(台風+前線) ■ 豪雨4(台風+前線) × 豪雨5(前線) ○ 豪雨6(台風) — 既往最大八斗島上流域

図-5 72時間雨量を対象とした水蒸気フラックスと流域平均雨量の関係, およびPMP推定結果

Fig. 5 Relation between moisture flux and 72-hr rainfall and estimated PMPs.

表-5 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面と継続時間, および回帰式の傾き
Table 5 Isobaric surface, duration of moisture flux and slope of linear regression equation that show the best correlation with rainfall for a given duration.

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			
	気圧面	継続時間	相関係数	回帰式の傾き	気圧面	継続時間	相関係数	回帰式の傾き	気圧面	継続時間	相関係数	回帰式の傾き
八斗島	550 hPa	12hr	0.86	0.82	500 hPa	12hr	0.83	1.19	550 hPa	24hr	0.82	1.85
烏・神流川	550 hPa	24hr	0.81	1.24	550 hPa	24hr	0.81	1.59	550 hPa	24hr	0.78	2.15
吾妻川	550 hPa	12hr	0.83	0.68	550 hPa	12hr	0.77	1.02	550 hPa	24hr	0.77	1.75
奥利根	550 hPa	24hr	0.79	0.93	550 hPa	24hr	0.79	1.24	550 hPa	24hr	0.79	1.61

とも高くなった組み合わせの計算結果と回帰式を示している。図中には現況, および気候変動を考慮したPMPの推定結果を合わせて示しているがこれについては後述する。

次に、八斗島上流域（橋本・矢島, 2015）, および各サブ流域における12, 24, 72時間最大雨量に対して最も相関が高くなった前橋地点における水蒸気フラックスの気圧面と継続時間を表-5に示す。八斗島上流域だけでなくサブ流域についても気圧面は500～550 hPaにおいて、また、継続時間は12～24時間との相関が高いことがわかる。相関係数はどの組合せにおいても0.75以上の高い相関が得られた。また表-5には、水蒸気フラックスの変化に対する12, 24, 72時間雨量の変化を八斗島上流域, およびサブ流域毎に示すため、回帰式の傾きをあわせて示している。この結果から、烏・神流川流域における回帰式の傾きが八斗島上流域、吾妻川流域、奥利根流域に対して大きく、水蒸気フラックスの増加に対して雨量の増加が大きいことが分かる。回帰式の傾きは72時間雨量を対象とした場合、烏・神流川流域の2.15に対してその他の流域では1.61～1.85と烏・神流川流域の増加率が16%～34%大きくなっている。同様な傾向は、12時間、24時間雨量に対してもみられる。これより、流域毎に降雨継続時間を考慮したPMPを設定する必要があることが分かる。

ここで、水蒸気フラックスの向きと降雨の地域特性について説明する。橋本・矢島・細川（2013）は検討対象6豪雨の風速ベクトル図を作成している。これより、風向は北東～東方向の割合が多く、水蒸気フラックスは烏・神流川を向いている場合が多いため雨量が大きくなっているものと考えられる。これは、利根川の主要な降雨要因は台風性であり台風が太平洋側を通過し進行方向に向かって左方向の風が強くなるため南東向き斜面を有する烏・神流川流域が台風からの水蒸気フラックスの影響を受け易い地域であるためであると考えられる。

図-6 前橋地点550 hPa面における年最大24時間水蒸気フラックスの経年変化

Fig. 6 Secular change of annual maximum 24-hr moisture flux at 550 hPa isobaric surface on Maebashi.

2. PMPの推定に用いる水蒸気フラックス

1) 過去最大水蒸気フラックスの推定

先に述べたように、表-5に示した八斗島上流域（橋本・矢島, 2015）および各サブ流域における水蒸気フラックスの気圧面と継続時間を対象として年最大水蒸気フラックスの経年変化を作成した。その例として、図-6には72時間雨量に対して八斗島上流域（橋本・矢島, 2015）および本論文で検討を行った各サブ流域で最も相関が高くなっている気圧面550 hPa, 継続時間24時間の水蒸気フラックスの経年変化を示している。この経年変化は前橋気象官署の地上観測値と550 hPa気圧面の水蒸気フラックスの関係式を用いて作成している。関係式の作成に用いたデータは過去の災害記録（国土交通省 水管理・保全局, 2006）から利根川流域に浸水被害が発生している八斗島上流域平均3日雨量が概ね150 mm以上の8豪雨のデータを用いて作成した。地上と気圧面の関係式の例として烏・神流川流域の関係図を図-7に示す。関係式の相関係数は0.2～0.8の間にあり必ずしも相関が高くない流域もあり関係式の作成方法や、今後のデータの更新により精度向上を図る必要がある。1901年～2013年の過去最大値は、1907年8月（明治40年8月）の台風時に発生した235 kg/kg・

図-7 水蒸気フラックスの地上観測と550 hPa面の関係図（烏・神流川流域）

Fig. 7 Relation between moisture flux at 550 hPa isobaric surface and ground station over the Karasu-Kannagawa Basin.

m/sとなった。この台風は関東で既往最大クラスの洪水をもたらした。12時間雨量、24時間雨量を対象とした過去最大水蒸気フラックスについては、八斗島上流域における12時間雨量、24時間雨量に対してそれぞれ、323 kg/kg・m/s（550 hPa, 12時間）、283 kg/kg・m/s（500 hPa, 12時間）となった。サブ流域については、烏・神流川流域および奥利根流域においては12時間雨量、24時間雨量とも235 kg/kg・m/s（550 hPa, 24時間）、吾妻川流域については12時間雨量、24時間雨量とも364 kg/kg・m/s（550 hPa, 12時間）が過去最大水蒸気フラックスとなった。なお、過去最大値は、いずれの継続時間においても1907年8月の台風時となっている。

2) 気候変動を考慮した最大水蒸気フラックス

気候変動を考慮した水蒸気フラックスは、気候変動予測値から得られる湿数を水蒸気混合比に変換し、風速を乗じて算定した。

将来気候の9ケースの予測値のそれぞれの予測期間20年間に発生した最大12時間、および最大24時間最大の水蒸気フラックスを図-8に示す。図-8の縦軸は気候変動を考慮した500 hPaにおける水蒸気フラックスを、横軸は「環境省地域気候変動モデル予測データ」の将来気候出力値の内、RCP8.5シナリオにおける9ケースを表す。この9ケースは、Ⅲ.4.3)において述べた積雲対流スキーム3ケースに対してそれぞれ、3つの海面水温のパターンを組み合わせたものである。各9ケースの横軸に表記している

図-8 気候変動を考慮したケース毎の最大水蒸気フラックス

Fig. 8 Maximum moisture flux for each prediction model under climate change.

ケース名は環境省（2014）の資料に従っている。例えばHFA_kf_rcp85_c3は、左から将来気候（HFA）、積雲対流スキーム（kf）、排出シナリオ（rcp8.5）、海面水温パターン（c3）の組み合わせからなるケースを表している。なお、積雲対流スキームがYSの場合はケース名には表記していない。また、積雲対流スキーム、排出シナリオ、および海面水温はケース名では小文字表記となっている。さらに、海面水温に表記されている番号はSST3などの海面水温パターンに対応している。この図から9ケースの最大水蒸気フラックスは最大12時間の場合は120～376 kg/kg・m/sの範囲に、最大24時間の場合は99～312 kg/kg・m/sの範囲にあることがわかる。これらから、180年間（9ケース×20年間）の水蒸気フラックスの最大値はKain-Fritschスキームにおける海面水温SST3との組合せのケース（HFA_kf_rcp85_c3）となっており、八斗島上流域における12時間雨量、24時間雨量および72時間雨量に対する最大の水蒸気フラックスはそれぞれ376 kg/kg・m/s、364 kg/kg・m/s、312 kg/kg・m/sとなった。サブ流域については、烏・神流川流域および奥利根流域においては12, 24, および72時間雨量に対して312 kg/kg・m/s、吾妻川流域については12, 24時間雨量に対して376 kg/kg・m/s、72時間雨量に対して312 kg/kg・m/sが気候変動を考慮した最大水蒸気フラックスとなった。

3. 現況、および気候変動を考慮したPMPの推定結果

先に述べたように、八斗島流域およびサブ流域における現況、および気候変動を考慮した72時間雨量のPMPを図-5に示した。八斗島上流域における現

況PMPは341 mmとなり、カスリン台風（1947）時の雨量を越える規模となった。また、WRFを用いた計算結果の72時間雨量最大値は386 mmとなっており、過去最大値であるカスリン台風時の3日雨量である318 mmを上回る雨量が発生している。また、気候変動を考慮した八斗島上流域のPMPは484 mmと現況PMPに対して約140 mm程度大きな値となった。

次に、サブ流域におけるPMPについて説明する。烏・神流川流域では現況PMPが386 mm、気候変動を考慮したPMPが552 mmと八斗島上流域におけるPMPに比べて14 %程度大きくなっている。これに対して、吾妻川流域、および奥利根流域におけるPMPは現況PMPがそれぞれ336 mm、300 mm、気候変動を考慮したPMPが472 mm、425 mmと八斗島上流域におけるPMPに対して小さくなっていることがわかる。次に、12時間雨量、および24時間雨量に対するPMPをあわせて図-9に示す。いずれの降雨継続時間においても、PMPは現況の72時間雨量および気候変動考慮後の24時間雨量と72時間雨量は烏・神流川流域、八斗島上流域、吾妻川流域、奥利根流域の順に大きくなっている。この傾向は、先に表-2に示した実績降雨量の最大値、および、表-5に示した指標の変化に対する降雨量の増加率も同様である。その他のPMPの地域毎の傾向は、現況の12時

間と24時間は八斗島上流域、烏・神流川流域、吾妻川流域、奥利根流域の順に、また、気候変動考慮後の12時間は烏・神流川流域、吾妻川流域、八斗島上流域、奥利根流域の順に大きくなっていた。このように、順位関係は異なるが烏・神流川流域のPMPが大きくなる傾向となっていることは同様である。

4. DAD式を用いた最大雨量との比較

図-9には、降雨継続時間毎、および流域毎のPMPの算定結果と関東地方のDAD式（国土交通省水管理・保全局, 2015b）を用いて算定した最大雨量（図中のDAD評価）の比較をあわせて示している。八斗島上流域においては、DAD式から算定された値は本論文の気候変動を考慮したPMPと同程度となっていることが分かる。次に、サブ流域では、本論文では烏・神流川流域、吾妻川流域、奥利根流域の順にPMPが大きくなっているのに対して、関東地方のDAD式を用いて算定された最大雨量は流域面積がほぼ等しいため概ね同じ値であり、かつ気候変動を考慮した値以上となっている。八斗島上流域においてDAD式から算定された値が本論文の気候変動を考慮したPMPと同程度となっていることについて次のように考察する。すなわち、DADを用いた方法（国土交通省の方法）は、近隣の河川等において発生した降雨量が当該河川でも起こり得る（そしてその最大値の包絡線をとる）という方法をとっている。これに対して、本論文における気候変動による外力増加に関しては、指標である水蒸気フラックスの地域毎の増加をもとに可能最大降水量の増加を推定している。このように検討条件の違いがあるため、本手法による気候変動を考慮した可能最大降水量とDAD手法による最大雨量が同程度の値となっているものと考えられる。

さらに、浸水想定検討に用いられているDAD曲線を用いた方法では流域面積のみによって15地域毎に雨量が決定されるため、標高や斜面の向きなどに応じた降雨のサブ流域特性を反映することが出来ない。これに対して本検討手法は、対象としたサブ流域毎の実績に応じた特性を反映することが出来るという長所がある。

5. 実績最大降雨量に対するPMPの変化

検討対象6豪雨の実績最大値に対するPMPの比率の比較を流域毎、降雨継続時間毎に図-10に示す。各流域におけるPMPは、降雨継続時間が短いほど実

図-9 継続時間毎、流域毎のPMPとDAD式による算定値の関係

Fig. 9 Estimated PMP and DAD for a given duration and basin.

図-10 現況, および気候変動を考慮したPMPの実績最大雨量に対する比率

Fig. 10 Ratio of present PMP and future PMP under climate change to the maximum observed rainfall.

績最大雨量に対するPMPの比率が大きく集中度の高い豪雨となっていることがわかる。八斗島上流域における現況PMPは実績最大雨量に対して、1.32倍～2.05倍となっている。この結果は小林ら（2012）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。さらに、気候変動を考慮した最大水蒸気フラックスから推定したPMPは1.87倍～2.46倍と実績最大雨量に対して概ね2倍程度の降雨量となった。

サブ流域毎の実績最大雨量に対する現況PMPの比率は烏・神流川流域が1.01倍～1.44倍、吾妻川流域が1.41倍～2.06倍、奥利根流域が1.44倍～1.80倍となっている。また、気候変動を考慮したPMPは烏・神流川流域が1.45～2.07倍、吾妻川流域が1.98倍～2.86倍、奥利根流域が2.04倍～2.54倍となっており、この結果から、PMPについては烏・神流川流域、吾妻川流域、奥利根流域の順に大きくなっているが、実績最大雨量に対する増加率は吾妻川流域、および奥利根流域の増加率が大きくなっていることがわかる。

6. PMPの時空間分の作成

1) 降雨成因を考慮したPMPの時間分布の設定

6豪雨を対象とした相対湿度の変化による雨量の時間分布の変化は橋本・矢島（2015）に詳しく述べられている。ここでは、代表例として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-11(a) (b)に示す。これを参考に降雨成因毎のPMPの時間分布は以下のように設定した。前線を伴わない台風性豪雨に関しては、相対湿度の増加に伴いピーク発生時刻が早まるとともに、一連降雨の前期に2山目が発生する（図-11(a)

図-11 相対湿度の変化が降雨成因毎の時間分布に与える影響

Fig. 11 Effects of relative humidity on the temporal rainfall distribution for a typhoon and/or front-induced rainfall.

参照) ことを考慮し相対湿度100% (図中rh_max) のWRF計算値、すなわち表-3における検討ケース6の時系列を引き伸ばして時間分布を設定した。これに対して、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（図-11(b) 参照）ため、表-3におけるケース1に相当する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。

2) PMPの降雨継続時間毎の時間分布の設定

降雨継続時間毎の時間分布の設定は、Ⅲ-5の3)に示したパターン2およびパターン3の設定を用いて時間分布は降雨継続時間の短い時間帯を先取りして作成した。ここでは、八斗島上流域における気候変動を考慮したPMPの作成例を豪雨6を対象として図-12に示す。まず、12時間雨量に対して270 mmとなるように引き伸ばしを行い、次に、24時間雨量の引き伸ばしは最大12時間を除く12時間の引き伸ばしにより24時間雨量が369 mmとなるように行っ

図-12 現況条件における降雨継続時間毎の引き伸ばしによる豪雨6の八斗島流域におけるPMP時間分布の作成例（降雨パターン3，豪雨6）

Fig. 12 PMP temporal distribution by multiplication of rainfall for 12, 24, and 72 hr duration under present condition for study event 6 over the Yattajima Basin (rainfall Pattern 3).

た。最後に、72時間雨量は最大24時間を除く48時間の引き伸ばしにより72時間雨量が484 mmとなるよう作成した。

3) PMPの地域分布の設定

地域分布の設定はⅢ-5の3)に示したパターン4に示した方法を用いてサブ流域毎のPMPとその時間分布を与えて設定した。ここでは、豪雨6を対象としたPMPの時間分布の算定例を図-13に示す。なお、サブ流域については烏・神流川流域の例を示しているが、吾妻川流域および奥利根流域についても同じ傾向である。PMPの時間分布は、八斗島上流域と各サブ流域などの地域特性、および現況と気候変動考慮の外力条件の違いによって以下の傾向があることが分かる。八斗島上流域では、表-3のケース6に相当する相対湿度100%雨量よりも各継続時間において図-12に示したように水蒸気フラックスと流域平均雨量の関係から推定したPMPが大きくなっている。一方、烏・神流川流域では気候変動考慮後のPMPは相対湿度100%雨量より大きくなっているのに対して、現況条件では相対湿度100%雨量よりも水蒸気フラックスと流域平均雨量の関係から算定したPMPの方が小さくなっている。

V. PMFの推定

1. PMFの推定結果

検討対象6豪雨のPMPと時空間分布を対象として表-6に示すように現況20ケース、気候変動考慮15ケースの流出計算を実施した。パターン2とパター

(a) 現況

(b) 気候変動考慮

図-13 現況，および気候変動を考慮した豪雨6の烏・神流川流域におけるPMP時間分布の作成例（降雨パターン4）

Fig. 13 PMP temporal distribution by multiplication of rainfall for 12, 24, and 72 hr duration under present and climate change conditions for study event 6 over the Karasu-Kannagawa Basin (rainfall Pattern 4).

表-6 現況，および気候変動を考慮した降雨パターン毎の八斗島地点ピーク流量

Table 6 Peak discharge on Yattajima for a given rainfall pattern under present and climate change conditions.

対象豪雨	八斗島地点ピーク流量 (m³/s)			
	パターン 1	パターン 2	パターン 3	パターン 4
豪雨1：2001/09/10	8,527	13,468	19,398	17,172
	—	12,888	26,825	27,563
豪雨2：2002/07/11	18,861	23,233	—	18,073
	—	26,224	—	27,698
豪雨3：2004/10/09	15,771	18,912	—	15,530
	—	22,368	—	30,045
豪雨4：2004/10/21	23,425	23,458	—	22,904
	—	33,734	—	34,945
豪雨5：2006/07/19	11,476	20,194	—	18,632
	—	14,419	—	30,023
豪雨6：2007/09/07	12,661	20,560	25,462	22,875
	18,463	20,623	34,149	35,733

※上段：現況，下段：気候変動

現況：気候変動：各豪雨中流量最大となる時空間分布パターン

現況：気候変動：6豪雨中最大となるパターン

ン3はⅣ.6の1)において述べたように降雨要因毎にどちらかを行うが、台風性の豪雨1および豪雨6

図-14 現況および気候変動考慮の降雨パターンで八斗島地点におけるピーク流量が最大となった豪雨6のハイドログラフ

Fig. 14 Temporal distribution of PMF on Yattajima under present and climate change conditions for study event 6.

に関しては現行の河川計画で実施されるパターン2の方法との降雨波形設定による流量の違いを示すため両方のパターンについて計算を行っている。また、気候変動を考慮したパターン1については現況の結果から各豪雨で最大にならないと判断されたため、全豪雨で結果として最大となった豪雨6についてのみ実施している。表-6には各豪雨で流量最大となる時空間分布のパターンと6豪雨中最大となるパターンを現況、気候変動考慮についてそれぞれ示している。現況条件では、豪雨6のパターン3の波形に対するピーク流量が約26,000 m³/sと最大となり、利根川水系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22,000 m³/s以上となった。一方、気候変動を考慮した条件では、豪雨6の地域分布を考慮したパターン4の波形に対する八斗島地点ピーク流量が約36,000 m³/sと最大となり、現況のPMFに対して10,000 m³/s程度大きくなった。ここでは、現況および気候変動を考慮したケースにおいて最大となった豪雨6の流出ハイドログラフを図-14に示した。

2. 時空間分布の違いが流量に与える影響

時空間分布の違いが流量に与える影響を把握するために、豪雨6の現況PMPについてパターン1～4の時空間分布より算出された流量の比較を行った結果を図-15に示す。72時間雨量が同じでも継続時間毎の最大化を行うパターン2は、実績雨量を一律に引き伸ばしたパターン1より最大流量が約7,000 m³/s大きくなった。また、降雨継続時間毎の雨量が同じであっても、WRFから得られた降雨波形を用いるパターン3は実績の降雨波形を用いるパターン2のピーク流量より約5,000 m³/s大きくなった。なお、地域分布を考慮した波形（パターン4）は烏・神流

図-15 現況条件において豪雨6の時空間分布が八斗島地点のPMFに与える影響

Fig. 15 Effect of temporal and areal rainfall pattern for study event 6 on PMF on Yattajima under present conditions.

図-16 気候変動を考慮した条件において豪雨6の時空間分布が八斗島地点のPMFに与える影響

Fig. 16 Effect of temporal and areal rainfall pattern for study event 6 on PMF on Yattajima under climate change conditions.

川流域および奥利根流域において12時間雨量が相対湿度100%雨量に対して引き縮めとなっており、八斗島上流域平均雨量がパターン3より小さくなっているため、ピーク流量もパターン3に対して約3,000 m³/s小さくなっている。

一方、豪雨6の気候変動を考慮したPMPについて、パターン1～4の時空間分布より算出された流量の比較を図-16に示す。継続時間毎の最大化を行うパターン2は、実績雨量を一律に引き伸ばしたパターン1より最大流量が大きくなる傾向は現況PMPの場合と同様である。また、降雨継続時間毎の雨量が同じであっても、WRFから得られた降雨波形を用いるパターン3は、実績の降雨波形を用いるパターン2のピーク流量より約14,000 m³/s大きくなった。次に、地域分布を考慮した波形（パターン4）は、サブ流域において12時間雨量が相対湿度100%雨量より大きくなっている現況PMP（図-12）の場合と違い、八斗島上流域平均雨量がパターン3より大きくなっている（図-13）ため、ピーク流量もパターン3に対して約1,600 m³/s大きくなっている。

以上の結果から、ピーク流量が最大となるのは現

況PMPではパターン3, 気候変動を考慮したPMPではパターン4であり, 現行の想定最大外力として国土交通省 水管理・保全局 (2015b) が設定しているパターン1の流量に対して大きくなるのが分かる。このようにPMPの降雨パターンの選定は, 対象流域に対して「被害最大」となるパターンを選定する必要がある。ただし, 本検討ではピーク流量最大をPMF検討の第一歩として選定したが, 今後は, 河道の整備状況や流域の氾濫特性等を踏まえて「氾濫ボリューム」にも着目した検討を行う必要がある。

VI. 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, 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把握し, 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。

12, 24, 72時間雨量は500~550 hPaの気圧面における12~24時間最大水蒸気フラックスとの相関が高いことを八斗島上流域および3つのサブ流域について示した。この結果から, 水蒸気フラックスに対する降雨量の増加率は, 烏・神流川流域が最も大きくなるなど地域毎の特性を反映することのできる有効な指標であることがわかった。また, 過去100年に遡った実績値, および180年間分の気候変動予測値を用いた水蒸気フラックスの長期データから現況, および将来のPMPと時空間分布の推定を行った。さらに, 複数洪水を対象とした流出計算により現況, および気候変動を考慮したPMFを算定した。その結果, 八斗島地点での現況PMFは利根川水系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, 気候変動によりPMFのピーク流量は現況に比べて約10,000 m³/s増加することを示し, 長期的な観点も踏まえたL2洪水の推定手法を示した。

以上を踏まえ, (1) 流域特性を反映したPMP評価ができること, (2) 気候変動とその不確実性を考慮したPMPの評価ができること, (3) 雨量だけでなくその時空間分布のパターンも踏まえたPMFの算出が可能であることなどが本論文で提案した手法の有用な特徴である。

今後の課題は以下のとおりである。まず, 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。また, 本論文の検討では2001年以降の

メソ客観解析データを用いて水蒸気フラックスと雨量の回帰式を作成したが, 気候変動を考慮した水蒸気フラックスに対しては雨量の推定が外挿となっている。このため, JRA-55再解析データ, 気候変動予測値等を用いてさらに大きな水蒸気フラックスの範囲で雨量との回帰式を作成し, PMPの推定精度の向上を図る必要がある。さらに, 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。以上を通して, PMPおよびPMFの推定精度を向上させることができると考えられる。

謝辞

本研究は, 一般財団法人国土技術研究センターの助成を受け実施した。本研究において利用した気候変動予測値のデータセットは, 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: Data Integration and Analysis System) の枠組みの下で収集・提供されたものである。また, 編集者, 査読者の方々に始め, 多くの方々から大変有意義なご指導, ご助言, ご助力を頂いた。ここに, 記して謝意を表す。

引用文献

- Abbs, D. J. 1999. A numerical modeling study to investigate the assumptions used in the calculation of probable maximum precipitation. *Water Resources Research*, 35(3): 785-796.
- Chen, L. C. 2005. An investigation of the moisture maximization for the probable maximum precipitation, Dissertation. University of Iowa:195.
- 橋本 健・矢島 啓・細川達也 2013. 利根川上流域を対象とした気象条件の最大化による可能最大降水量 (PMP) の推定. 土木学会論文誌B1 (水工学), 69 (4): I_331-I_336.
- 橋本 健・矢島 啓 2015. 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. 土木学会論文誌B1 (水工学), 71 (4): I_487-I_492.
- Hershfield, D.M. 1961. Estimating the probable maximum precipitation, *Journal of the Hydraulics Division. ASCE.*, 87(5):99-106.
- Ishida, K. Kavvas, M. L. Jang, S. Chen, Z. Q. Ohara, N. and Anderson, M. L. 2015. Physically Based Estimation of Maximum Precipitation over Three Watersheds in Northern California: Relative Humidity Maximization Method, *Journal of Hydrologic Engineering*, 20, (10):04015014, 1-7. DOI:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001175.
- 環境省 2014. 日本国内における気候変動予測の不確実性を考慮した結果について (お知らせ). 別添資料: 6-8.
- 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 2013. 気候変動適応策に関する研究 (中間報告). 国総研資料 749号: II-112-154.
- 国土交通省 水管理・保全局 2015a. 新たなステージに対応した防災・減災のあり方: 3-8, <http://www.mlit.go.jp/common/001066501.pdf>. (参照: 2016/9/1).

国土交通省 水管理・保全局 2015b. 浸水想定（洪水、内水）の作成等のための想定最大外力の設定手法, http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/pdf/shinsuisoutei_honnun_1507.pdf. (参照: 2016/9/1).

国土交通省 水管理・保全局 2006. 利根川水系河川整備基本方針 参考資料 基本高水等に関する資料: 8.

小林健一郎・奥勇一郎・寶 馨・石川裕彦・竹見哲也・中北英一 2012. 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: 9-14.

桑原英夫 1986. 日本における最大級豪雨の時間的空間的集中特性に関する実証的研究. 東京大学大学院農学系研究科 (現: 農学生命科学研究科) 博士論文: 181.

日本学術会議 2011. 河川流出モデル・基本高水の検証に関する学術的な評価. (参考 資料 6) 新モデルによる洪水流出計算の再現に関する報告: 116-145, <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-k133-1-6.pdf>. (参照: 2016/9/1).

社会資本整備審議会 河川分科会 2015. 水災害分野における気候変動適応策のあり方について 中間とりまとめ: 17-20, http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinkai/kikouhendou/pdf/1508_02_toushinonbun.pdf. (参照: 2016/9/1).

Tan, E. 2010. Development of methodology for probable maximum precipitation over the American River watershed using the WRF model. Dissertation. University of California Davis: 175.

World Meteorological Organization 2009. Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP) - No.1045.

(受付: 2016年9月4日, 受理: 2017年7月25日)
この論文への討議・コメントを, 2018年5月末日まで受け付けます.

Estimation of Probable Maximum Precipitation and Probable Maximum Flood Through Maximization of Atmospheric Conditions

Ken HASHIMOTO ¹⁾† Hiroshi YAJIMA ²⁾

¹⁾ River Department, Pacific Consultants Co., Ltd.
(3-22 Kanda-nishikicho, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8462, Japan)

²⁾ Estuary Research Center, Shimane University
(1060 Nishikawatsu-cho, Matsue 690-8504, Japan)

†Corresponding Author E-mail: ken.hashimoto@ss.pacific.co.jp

Flood damage from heavy rainfall is increasing recently, as Typhoon No. 12 in 2011 and the Kinu River flooding in 2015 demonstrate. Moreover, rainfall and flood discharge are expected to increase because of climate change. We specifically examined the Probable Maximum Precipitation (PMP) and Probable Maximum Flood (PMF) depending on rainfall durations and basin areas through atmospheric conditional change for upstream areas of the Yattajima, Tone River Basin. We proposed an index correlated with rainfall using the WRF model, and evaluated its maximum value using long-term data to estimate PMP and PMF.

Results show the following: (1) Moisture fluxes show high correlation with 12-hr to 72-hr rainfall, for the upstream basin of Yattajima, and for its sub-basins through WRF model calculation in the area, which suggests that they can be used as suitable parameters to estimate PMP. (2) Estimation methods of PMP were shown by maximum moisture flux for the past 100 years and by climate model outputs for RCP8.5 scenario. (3) Temporal and areal distributions of PMP depend on the type of typhoon and/or front. (4) PMFs were evaluated using a run-off model for heavy rainfall patterns in current and climate change conditions.

Key words : PMP, PMF, WRF model, moisture flux, climate change