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

ESTIMATION OF PROBABLE MAXIMUM PRECIPITATION THROUGH
MAXIMIZATION OF MOISTURE FLUXES OVER THE UPPER TONE RIVER BASIN

橋本健¹・矢島啓²

Ken HASHIMOTO, and Hiroshi YAJIMA

¹正会員 修(工) パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒163-6018 新宿区西新宿6-8-1)

²正会員 博(工) 鳥取大学准教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

We focus on the Probable Maximum Precipitation (PMP) over the Upper Tone River basin, through weather conditions change. In order to evaluate total amount and distributions of heavy rainfalls, WRF model is used. The results are summarized as follows: (1) Temporal rainfall distribution change by relative humidity modification has a different characteristics depending on the rainfall type (typhoons and/or fronts). (2) In the case of typhoons, an increase of relative humidity affects not only total rainfall but also its temporal variation. (3) Moisture fluxes show high correlation with total and 12 to 72-hour rainfalls through WRF model calculation in the basin, which clearly suggests they can be used as a suitable parameter to estimate PMP. (4) PMP is calculated from the past maximized moisture flux in 12, 24, and 72-hour rainfall durations.

Key Words : PMP, moisture flux, relative humidity, WRF model, typhoon, front

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. 国土交通省では, 台風等に伴う被害を最小化させるために, 2014年1月に「水災害に関する防災・減災対策本部」を設置しており計画規模を超える外力に対する防災計画, 効率的な対策の立案が議論されている. 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¹⁾, この一つの指標として可能最大降水量 (Probable Maximum Precipitation ; PMP) がある.

PMPの推定には, 気象条件を最大化する方法, 桑原²⁾のDAD解析結果を用いる方法, Hershfield³⁾による統計的な方法, 気象モデルを用いた方法などがある. 気象条件を最大化する方法には, 可降水量を指標とした世界気象機関(WMO)による方法⁴⁾, 利根川流域を対象としてメソ客観解析データを用い, 850-800hPaの気圧面における水蒸気フラックスを指標として用いる橋本ら⁵⁾の方法がある. ただしこれらの方法は, 気象条件の増加に対して雨量も線形的に増加するとした考え方であり, 気象現象を踏まえた最

大化率の設定が行われていない. 気象現象を考慮した最大化率の設定には, 近年の発展した気象モデルを用いた方法がある. 3次元気象モデルを用いたPMPの推定には, RAMSを用いたAbbs⁶⁾の方法, MM5を用いたChen⁷⁾の方法, 領域気象モデルWRFを用いたTan⁸⁾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, 物理モデルを用いて気象要素と雨量の線形関係を把握した方法である. そのため, 山地流域を有する複雑な日本の地形条件での適応には問題があることが予想される.

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, 次の2つがあげられる. 橋本ら⁹⁾は, 利根川上流域を対象とし, WRFを用いて2007年9月の台風性豪雨の気象条件を変化させた検討を行った. その結果, 八斗島上流域の72時間雨量は, 前橋地点における12時間最大850-800hPaの水蒸気フラックスで表すことができることを示した. しかし, 対象降雨が台風性の1つの豪雨であり, 異なる降雨成因による豪雨は考慮されておらず, PMPの算定には至っていない. 小林ら¹⁰⁾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

図-1 利根川流域図

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．

以上のことから本研究では利根川上流域を対象に，既往検討⁵⁾からの改善を図る．まず，様々な降雨成因に広く適用できるよう，台風性，台風+前線，前線性など複数の成因の豪雨を対象に検討を行う．次に，気象条件の変化はWRFを用いて豪雨時の大気場の相対湿度を変化させることにより，水蒸気フラックス等が雨量の時間分布に与える影響を評価し，PMPの算定及びその手法についての考察を行う．なお，風速により水蒸気フラックスを変化させることも可能であるが，それは既往研究で利根川流域の顕著な雨量の増加につながらないことが明らかとなっており⁹⁾，また，気圧場を考慮せず風速のみを変化させることは気象学的に疑問が残るため本論文では採用しないことにした．

2. 気象モデルを用いたPMP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時間雨量に対しても評価する．

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 $2,000\text{m}^3/\text{s}$ 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

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

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格子)利根川流域を含む第3領域は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，WRFを用いて計算された雨量について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比較を行う．

(3) 気象条件変化の検討ケース

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．

(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⁹⁾。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を用いた再現計算結果において雨量と最も相関が高い気圧面での継続時間内の平均水蒸気フラックスが最大となる時間帯において、地上観測値から算定される水蒸気フラックスを6豪雨について算定し、気圧面での値との相関式を作成する。この相関式を用いて、前橋気象官署の1961年～2013年の53年間の地上観測値から得られた水蒸気フラックスの過去最大値を相関の高い気圧面相当の値に変

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		+ 30%	相対湿度を増加
6		最大化	全層の相対湿度を100%

図-3 2006年7月豪雨(豪雨5)の72時間解析雨量と再現計算結果の時間分布の比較

図-4 2006年7月豪雨の72時間解析雨量と再現計算結果の平面分布の比較

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。

3. 気象条件の変化が豪雨の時間分布に与える影響

(1) 実績豪雨の再現性

八斗島上流域での平均雨量を対象にWRFを用いて算定した雨量と気象庁の解析雨量との比較を行った。その結果、解析雨量の72時間雨量に対する再現性は68%から169%の間にあった。また、最大1時間流域平均雨量に関しては解析雨量値の77%から159%となっており、計算のピーク発生時間は6豪雨中5豪雨が1-7時間程度解析雨量より早くなり、1豪雨(豪雨3)が解析雨量より1時間遅れていた。

検討対象6豪雨のなかで最も再現性の高い豪雨5(前線性)の解析雨量との時間分布の比較を図-3に示す。降雨分布の第1ピークは解析雨量が10.6mmに対し計算値が9.9mm、第2ピークでは解析雨量が9.2mmに対して計算値が7.5mmとなっている。最大72時間流域平均雨量に関しては、解析雨量が225.8mmに対して計算値が188.3mmとなっている。また、72時間雨量の平面分布は図-4に示すように解析雨量の分布と計算結果は概ね一致しておりWRFにより豪雨が再現されていることが確認できた。

(2) 相対湿度の影響

a) 最大72時間雨量に与える影響

WRFを用いて相対湿度を変化させたときの八斗島上流域の72時間流域平均雨量の変化を図-5に示す。ただし雨量は、再現計算時の72時間雨量で規準化している。この図から、相対湿度の変化による雨量の変化は台風、前線などの降雨成因によって異なることがわかる。前線を伴わない台風性豪雨(赤線)である豪雨1, 6は、相対湿度の増加に伴い72時間雨量も概ね増加する。一方、前線を伴う台風(青線)である豪雨2, 3, 4は、相対湿度が+10%から+30%で雨量が減少する。また、前線性豪雨(緑線)である豪雨5は、再現計算時より相対湿度の増加により雨量が低下する結果となった。このような傾向は12時間雨量および24時間雨量に関してもみられた。これは、台風性豪雨は相対湿度の変化に対してほぼ同じ位置で降雨量が増加し平面分布に変化がない⁹⁾のに対し、

図-5 相対湿度の変化による降雨成因毎の最大72時間雨量

前線性豪雨では相対湿度の変化に対して降雨の平面分布が変化することにより流域内雨量としては減少しているためである。

b) 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の例を図-6に示す。台風性豪雨(豪雨1, 豪雨6)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分かる(図-6(a), (b)参照)。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(図-6(c)参照)。図-6(c)は実績72時間雨量の最も大きい豪雨2の例であるが、豪雨3,4についても同様な傾向であった。

図-6(d)に示す前線性豪雨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。

相対湿度による雨量の時間分布の変化については、台風性豪雨について同様の研究成果⁹⁾があり、豪雨2,3,4,5などの前線を伴う降雨にはこのような変化は見られないことから、台風性豪雨に関する特徴と考えられる。

(3) 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¹¹⁾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。このように、前線を伴う豪雨では台風性豪雨より高い気圧面における水蒸気フラックスと相関が高い結果となることが明らかとなった。

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く⁹⁾、豪雨6についてWRFを用いた検討⁹⁾においても同様な結果となっている。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

図-6 相対湿度の変化が降雨成因毎の時間分布に与える影響

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面と継続時間（直線近似）

対象豪雨	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	0.856	550hPa	12hr	0.829	500hPa	12hr	0.819	550hPa	24hr
台風性:豪雨1,6	0.967	800hPa	24hr	0.944	850hPa	36hr	0.844	850hPa	36hr
台風+前線:豪雨2,3,4	0.793	750hPa	36hr	0.824	550hPa	12hr	0.881	550hPa	12hr
前線性:豪雨5	0.975	600hPa	48hr	0.959	500hPa	3hr	0.985	500hPa	24hr

図-7 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

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-7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。

4. PMP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-8に示す。両者の相関係数は0.73となっている。破線で示す地上と550hPa気圧面の水蒸気フラックスが等しくなる線より右側の3点が台風性豪雨1, 6および前線を伴う台風のうち実績雨量が最大となる豪雨2となっている。一方、左側の3点が前線を伴う台風である豪雨3, 4と前線性の豪雨5となっている。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ところ、24時間雨量を対象とした関係式の相関係数は0.82と高い値を示したが、12時間雨量を対象とした相関係数は0.55となった。

図-8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-9に示す。過去最大値は、72時間雨量に

関しては2011年9月に発生した台風12号時の232.2 kg/m²s であった。台風が大型で移動速度が遅く大きな水蒸気フラックスとなった。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はそれぞれ 264.8kg/m²s、231.8kg/m²sとなった。

(2) PMPの評価

図-7に青線で、図-9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示した。72時間雨量における、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相当に変換した値から推定した最大雨量は337mmとなり、カスリン台風時の雨量を越える規模となった。客観解析データを用い水蒸気フラックスと降雨量の線形関係を仮定して算定した橋本らの検討⁵⁾では、同じ対象豪雨を用いても最大値が450mmと、今回の結果は従来より小さく推定された。また、本来なら降雨成因ごとに評価を行う方が望ましいと考えられるが、前橋気象官署の地上観測値と比較できる豪雨が2～3豪雨と少ないため、現段階ではそれが難しい。今後、1958年から高層の推定値の得られる長期再解析データJRA-55を用いて主要洪水のデータを追加する必要がある。

以上のような問題はあるが、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1.30倍～1.61倍となっている。この結果は小林ら¹⁰⁾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。

図-8 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(図中の番号は豪雨番号)

図-9 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

5. 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、水蒸気フラックスを用いたPMPの推定を試みた。その結果、以下のことを明らかにした。

- (1) WRFを用いて相対湿度を変化させた豪雨のシミュレーションより、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12, 24, 72時間雨量のPMPの推定を行った。

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	177.4	228.9	337.0
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	1.61	1.53	1.30

今後は気象モデルWRFを用いて、降雨の時空間分布にも着目した降雨の最大化、大気の安定性に関わる指標から降水変換効率と雨量の関係も明らかにする予定である。また、これらの条件を踏まえ、降雨に影響を及ぼす気象条件の最大化を行いPMPを継続時間毎に推定し、その結果から流出計算により流量変化から可能最大洪水PMFを推定したいと考えている。

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。ここに、記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 玉井信行:2011年7月新潟・福島豪雨災害の概要と超過洪水対策について、H23年度 河川災害に関するシンポジウム, 土木学会水工学委員会。
- 2) 桑原英夫: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, 東京大学博士論文, 1986。
- 3) Hershfield, D. M.: Estimating the probable maximum precipitation, *J. Hydraul. Civ. Am. Soc. Civ. Eng.*, 87(HY5), 99-106, 1961。
- 4) World Meteorological Organization: Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation(PMP) WMO-No. 1045, 2009。
- 5) 橋本健・矢島啓・細川達也: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, 水工学論文集, 第57巻, pp.143-152, 2013。
- 6) Abbs, D.J.: A numerical modeling study to investigate the assumptions used in the calculation of probable maximum precipitation, *Water Resources Research*, 35(3), pp.785-796, 1999。
- 7) Chen, L.C.: An investigation of the moisture maximization for the probable maximum precipitation, Dissertation, University of Iowa, 195pp, 2005。
- 8) Tan, E.: Development of methodology for probable maximum precipitation over the American River watershed using the WRF model, *Dissertation abstracts International*, 71(06), Section B, p.3827, 2010。
- 9) 橋本健・矢島啓・細川達也:利根川上流域における気象条件の変化が可能最大降水量(PMP)と時空間分布に与える影響, 水工学論文集, 第58巻, pp.537-552, 2014。
- 10) 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。
- 11) 吉崎正憲・加藤輝之:豪雨・豪雪の気象学, 朝倉書店, pp.72-76, 2007。

(2014. 9. 30受付)