

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

2015 年 7 月

橋本 健

目 次

頁

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 従来の研究	1
1.3 本研究の目的	4
1.4 本論文の構成	4
第 2 章 対象流域と対象豪雨	7
2.1 検討対象流域	7
2.2 検討対象豪雨	8
2.2.1 対象豪雨の選定	8
2.2.2 対象豪雨の降雨成因と降雨特性	8
2.2.3 対象豪雨における気象概況と被害状況	10
第 3 章 気象モデルによる実績豪雨の再現性	27
3.1 概説	27
3.2 計算モデルと計算条件	27
3.2.1 気象モデル WRF について	27
3.2.2 WRF のモデルの概要	30
3.2.3 WRF モデルの解析に使用するデータ	34
3.2.4 NCEP-FNL データの精度検証	36
3.2.5 WRF を使用した豪雨の再現方法	45
3.3 実績豪雨の再現性	46
3.3.1 再現計算結果からの物理的パラメタリゼーションの選定	46
3.3.2 6 豪雨を対象とした再現性	50
3.4 結語	61
第 4 章 気象条件の変化が豪雨の時空間分布に与える影響	65
4.1 概説	65
4.2 影響の検討手法	65
4.2.1 降雨に影響を与える気象条件の検討方法	65
4.2.2 気象条件の変化が降雨に与える影響の検討方法	68
4.3 降雨に影響を与える気象条件の評価	68
4.3.1 流域内の気象条件の評価に用いる観測所の検討	68
4.3.2 可降水量と降水量の関係	72
4.3.3 水蒸気フラックスと降水量の関係	73
4.3.4 降雨継続時間に対する水蒸気フラックスの相関	78
4.4 気象条件変化の検討ケース	79
4.5 相対湿度の影響	80
4.5.1 継続時間毎の最大雨量に与える影響	80
4.5.2 時間分布に与える影響	84
4.5.3 地域分布に与える影響	89
4.6 雨量と水蒸気フラックスの関係	97
4.6.1 八斗島上流域	97
4.6.2 烏・神流川流域, 吾妻川流域, および奥利根流域	99
4.7 結語	104

第 5 章 可能最大降水量 (PMP) と時空間分布の推定	107
5.1 概説	107
5.2 PMP の推定手法	107
5.2.1 現況での PMP の推定手法	107
5.2.2 気候変動を考慮した PMP の推定手法	107
5.3 PMP の時空間分布の推定手法	109
5.3.1 時間分布の推定手法	109
5.3.2 地域分布の推定手法	110
5.4 過去最大水蒸気フラックスの評価	111
5.4.1 降雨と相関の高い気圧面と地上観測値の関係把握に用いる主要豪雨	111
5.4.2 前橋地点と JRA55 観測地点における補正	112
5.4.3 降雨と相関の高い気圧面における水蒸気フラックスと地上観測値の関係	115
5.4.4 過去最大水蒸気フラックスの算定	120
5.5 気候変動を考慮した評価	125
5.5.1 将来気候における八斗島上流域の 3 日雨量	125
5.5.2 水蒸気フラックスの評価	127
5.6 PMP の評価	130
5.6.1 現況での PMP 評価	130
5.6.2 気候変動を考慮した PMP 評価	131
5.7 時空間分布の評価	139
5.8 結語	169
第 6 章 可能最大洪水 (PMF) の推定	171
6.1 概説	171
6.2 PMF の推定手法	171
6.3 PMF の推定結果	174
6.3.1 現況での PMF	174
6.3.2 時空間分布の違いが流量に与える影響	177
6.3.3 気候変動を考慮した PMF	179
6.4 結語	182
第 7 章 結論	185
7.1 結論	185
7.2 今後の課題	187
謝 辞	189

第1章 序論

1.1 研究の背景

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²⁾、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³⁾、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 月には国土交通省において「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行われてきた⁴⁾。

このような背景を踏まえ、治水対策においても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。

1.2 従来の研究

PMP とは、「流域内で物理的に発生しうる降雨の内、最も大きな降水量」と定義され、1930 年以前の米国で最大流量が頻繁に更新されていた頃、可能最大流量を決定するためのインプットとして PMP を求める必要があったのが起源とされている⁵⁾。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。これらには、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研究は少ない。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を推定する研究についてはほとんど見られない。各方法の主な概要と問題点を以下に示す。

(1) 統計的な方法

統計的な方法には Hershfield の方法⁶⁾、北野らの方法⁷⁾、および国土交通省 水管理・国土保全局の方法⁴⁾などがある。Hershfield の方法は、式(1.1)に示すように、統計年数 n における年最大値から平均値と標準偏差を算定し平均値に統計的変数 K_m を標準偏差を乗じた値を加えた値を推定する方法である。統計的変数 K_m はいくつかの観測所地点の最大雨量から算定して他の地点も適用する方法である。この方法の問題点としては、この手法は K_m を可能最大降雨に対するものとして設定することができない、他の地点に適切な値を得ることが困難であることが課題としてあげられる。

$$X_t = \bar{X}_n + K_m S_n \quad (1.1)$$

ここに X_t ：最大観測雨量， \bar{X}_n ： n 年間の年最大値の平均， S_n ： n 年間の年最大値の標準偏差値， K_m ：統計的変数である。

北野らの方法は極値統計解析による降水量の上限の推定を試みている方法であるが、過去のデータから可能最大値を推定するには至っていない。また、国土交通省 水管理国土保全局では「想定最大外力(洪水，内水)の設定に関する技術検討会」における設定手法案として年超過確率 1/1,000 降雨量を設定し地域区分毎の既往最大降雨からの設定と合わせて検討することとしている。しかし、これはあくまでも他の手法により設定された値の妥当性確認の意味合いが強く、降雨量の上限値としての可能最大降水量の評価ではない。

(2) DAD 解析結果を用いる方法.

DAD 解析結果を用いる方法には、桑原の方法⁸⁾、国土交通省 水管理・国土保全局の方法⁴⁾などがある。桑原は全国の気象官署における 1982 年までの雨量を 10 分間雨量から 24 時間雨量までを整理し、式(1.2)に示すように DAD 曲線を作成している。このため、降雨の地域特性が反映されていないこと、日本の直轄河川において計画降雨継続時間として採用されている 2 日から 3 日雨量は外挿となっていることなどの課題があり、直轄河川の河川整備基本方針で対象とする降雨量の約 5 倍から 10 倍の値を与える場合がある。

$$P = 279 \cdot t^{0.5} \cdot \exp(-0.0248 t^{0.414} A^{0.5}) \quad (1.2)$$

国土交通省 水管理・国土保全局はクリーガー曲線などの既往研究における地域区分と降雨特性のクラスター分析の結果を重ね合わせ、Mann-Whitney のU検定を行い地域区分の設定を行っている。そして、この地域区分毎の過去の最大値を面積毎、降雨継続時間毎に包絡し DAD 曲線を作成している。

(3) 気象条件を最大化する方法

気象条件をを最大化する方法には、世界気象機関(WMO)発刊の PMP 推定マニュアル⁹⁾に記載されている方法、Fernando らの方法¹⁰⁾がある。WMO が発刊する PMP 推定マニュアルには、PMP は「気象条件の最大化」、「転置」、「包絡」という 3 ステップによって推定されると記されている。この中で最も重要な概念である、「気象条件の最大化」について説明する。

「気象条件の最大化」とは、既往豪雨時における降水量を豪雨発生時の大気条件よりも降水量を増加させる条件を与えることにより、その降水量を増大させることである。この方法では、地表面から大気圏上端に達する気柱に含まれる水蒸気の総量である可降水量を用いて気象条件の最大化を行っている。また、可降水量は、偽湿潤断熱過程を仮定し、地表面の露点温度から可降水量を求め、各豪雨で 12 時間持続最大可降水量を求める。また、過去最大の 12 時間持続最大可降水量を求め、PMP を式(1.3)で求めている。

$$P_{\max} = \left(\frac{PW_{\max}}{PW} \right) \times P \quad (1.3)$$

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。これらの方法は、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、降雨現象をかなり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。すなわち、指標とする可降水量の増加率が降水量の変化率であるとする考え方である。また、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あるかの課題があり、この点については第 4 章で検証する。

(4) 気象モデルを用いた方法

気象モデルを用いた方法には、矢島らの方法¹¹⁾、Abbs の方法¹²⁾、Cotton の方法¹³⁾、Zhao の方法¹⁴⁾、Chen らの方法¹⁵⁾、Kavvas の方法¹⁶⁾、Tan の方法¹⁷⁾、および小林らの方法¹⁸⁾がある。

矢島ら¹¹⁾は、一次元積雲対流モデルを用いて、降水量とそれに関係のあるパラメータとして、地表の相対湿度、大気不安定度を表す CAPE 値などの関係について検討を行っているが、PMP を推定するまでには至っていない。3 次元の気象モデルを用いた PMP の推定には、RAMS を用いた Abbs、Cotton らの方法^{12) 13)}、MM5 を用いた Zhao、Chen、および Kavvas らの方法^{14) 15) 16)}、領域気象モデル WRF を用いた Tan の方法¹⁷⁾、などがある。これらの方法は、大気場を変更することにより可降水量等をパラメータとした PMP の推定を行っている。これらは気象モデルを用いて相対湿度と降雨の関係を評価した手法であり、山地流域を有する複雑な日本の地形条件とは異なる特性が予想される。

日本の河川流域を対象として気象モデルを用いた研究には、小林らの研究¹⁸⁾がある。小林ら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が目的ではない。

(5) PMP の時空間分布および可能最大洪水 (PMF) に関する研究

国土交通省水管理・国土保全局の方法⁴⁾では、氾濫した際の被害が最大となるものから選定することを基本とするとしている。その上で、「降雨波形については、河川整備基本方針の基本高水の設定の前提とした降雨波形を用いることを基本とする。流出解析等において、河川整備基本方針の基本高水の設定の前提とした降雨波形を設定した降雨量まで単純に引き伸ばすことにより著しく不合理が生ずる場合(例えば短時間に降雨が比較的集中している降雨

波形を引き伸ばした結果、洪水のピーク流量に支配的な降雨継続時間内の降雨強度が著しく大きくなる場合など)には、修正を加えるものとしている。修正については、降雨波形を変更することや、降雨継続時間を流域の大きさ、降雨の特性、洪水流出の形態等を考慮して見直すことが考えられる。」とされており、気象条件の変化による時空間分布の変化は考慮されていない。

また、WMO の PMP 推定マニュアル⁹⁾においては、PMF 検討の際の時空間分布の設定について、転置法、組み合わせ法などの方法が示されているが、組み合わせ計画に関しては総観気象学に基づく解析、気候学に基づく解析等経験的な手法の説明となっている。

1.3 本研究の目的

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。特に本研究では、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。

1.4 本論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである。第2章では対象流域の概要と対象降雨の選定理由を述べる。第3章では、気象モデルWRFの再現性を検討する。第4章ではWRFを用いて気象条件の変化と降雨の時空間分布の関係を把握する。以上の関係を用いて、第5章ではPMPとその時空間分布の推定手法を示し、第6章にPMFを推定する手法を提案する。

第1章の参考文献

- 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， pp.Ⅱ-112-154， 2013.
- 2) 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：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， pp.17-20， 2015.
- 3) 国土交通省：新たなステージに対応した防災・減災のあり方， pp.3-8， 2015.
- 4) 国土交通省 水管理・保全局：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， 2015.
- 5) 辻基宏・大石哲・中北英一・池淵周一：狭域・短時間の可能最大降水量 (PMP) 推定手法に関する研究，京都大学防災研究所年報，40(B-2)， pp.245-262， 1996.
- 6) Hershfield, D. M. : Estimating the probable maximum precipitation, *J. Hydraul. Civ. Am. Soc. Civ. Eng.*,87(HY5), pp.99-106, 1961.
- 7) 北野利一，高橋倫也，田中茂信：極値統計解析による降水量の上限の推定可能性：土木学会論文集 B1 (水工学)，70(4)， pp.I_451-I_456， 2014.
- 8) 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.
- 9) World Meteorological Organization : Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation(PMP) WMO-No.1045, 2009.
- 10) W.C.D.K.Fernando & S.S.Wickramasuriya : The hydro- meteorological estimation of probable maximum precipitation under varying scenarios in Sri Lanka, *International Journal of Climatology*, 31, pp.668-676, 2011.
- 11) 矢島啓・辻基宏・池淵周一・中北英一：積雲対流モデルを用いた短時間可能降水量 (Probable Maximum Precipitation) 推定手法の検討，水文・水資源学会誌，9(2)， pp.143-152， 1996.
- 12) 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.
- 13) Cotton,W.R., Collins., F., McAnelly, R. L. and Ashby, C.T. : Simulations of extreme precipitation events in the Colorado Rocky Mountains, 10th Conference on Mountain Meteorology and the Mesoscale Alpine Programme (MAP) Meeting 2002, 17-21 June, Park City, UT, pp.1-2,2002.
- 14) Zhao, W., Smith, J. A and Bradley, A. A : Numerical simulation of a heavy rainfall event during the pre-storm experiment, *Water Resources Research*, 33(4), pp.783-799, 1997.
- 15) Chen, L.C. : An investigation of the moisture maximization for the probable maximum precipitation, Dissertation, University of Iowa, pp.102-134, 2005.
- 16) M.L.Kavvas,K.Ishida,S.Jang,N.Ohara,Z.Q.Chen,and M.Anderson : Maximization of Historical Severe Precipitation Events over American, Yuba and Feather River Basins, Estimating Probable Maximum Precipitation in Mountainous Watersheds, California Extreme Precipitation Symposium, pp.8-11, 2014.

- 17) 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, pp.3827, 2010.
- 18) 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，55(B)，pp.9-14，2012.

第2章 対象流域と対象豪雨

2.1 検討対象流域

本研究は、図 2.1 に示す利根川流域の基準地点八斗島地点より上流の利根川上流域を対象として研究を行う。対象流域は、北から奥利根、吾妻川、烏・神流川流域という小流域から成る。対象流域として利根川流域を選定した理由は、日本の直轄河川のうち日本最大の流域面積 $16,480\text{km}^2$ 、(八斗島基準地点上流流域面積は約 $5,100\text{km}^2$) となっていること。さらに、利根川流域は、日本の政治・経済の中心地である東京を含む首都圏を氾濫区域に含み、日本の人口の約 10% が含まれる重要度の高い流域であること等である。1947 年に発生したカスリーン台風は、3 日間で八斗島流域平均雨量が 318mm と既往最大の豪雨をもたらし、八斗島地点の下流側、埼玉県北埼玉郡東村と川辺村(現加須市)の堤防が決壊し東京都葛飾区や江戸川区まで氾濫し、死者約 500 人という被害が発生している。利根川水系河川整備基本方針¹⁾では、計画降雨継続時間は 3 日であり、八斗島基準地点における基本高水のピーク流量が $22,000\text{m}^3/\text{s}$ 、計画高水流量 $16,500\text{m}^3/\text{s}$ となっている。

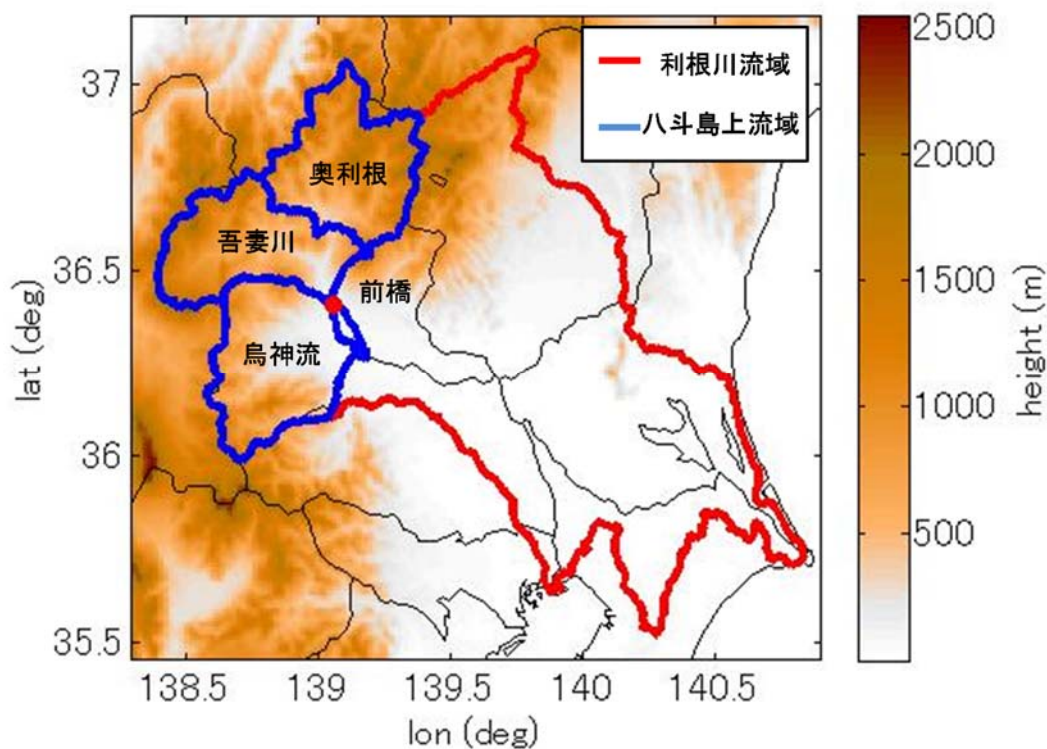


図 2.1 利根川流域図

2.2 検討対象豪雨

2.2.1 対象豪雨の選定

表 2.1 に検討対象とする豪雨を示した。検討対象豪雨は時空間解像度の高いメソ客観解析データの存在する 2001 年 3 月以降の主要豪雨を対象とした。その結果、解析雨量を用いて作成した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 以上となっている豪雨を選定した。これらの中で、八斗島上流域平均 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。また、烏・神流川流域、吾妻川流域および奥利根流域における 12, 24, 72 時間流域平均最大雨量を表 2.2～表 2.4 に示す。

2.2.2 対象豪雨の降雨成因と降雨特性

対象豪雨の降雨成因は図 2.2 に示す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。台風性豪雨については台風経路図を図 2.3 に示す。これらの豪雨の時間分布を、八斗島流域および小流域である烏・神流川流域、吾妻川流域および奥利根流域について作成した結果を図 2.4～図 2.9 に示す。また、最大 72 時間雨量の空間分布を 50mm 毎の等雨量線を図 2.10～図 2.15 に示した。八斗島流域平均 12, 24, 72 時間雨量が最大となった豪雨 6 は、図 2.15 の 72 時間雨量分布図において烏・神流川流域において降雨が集中していることがわかる。

表 2.1 解析対象豪雨

豪雨 番号	生起日	八斗島上流域平均雨量 (mm)			八斗島 流量 (m ³ /s)	降雨成因
		12hr	24hr	72hr		
1	2001/09/10	72.0	120.8	175.2	6,785	台風15号
2	2002/07/11	84.9	127.8	159.2	5,973	台風6号, 梅雨前線
3	2004/10/09	55.7	86.2	98.4	2,124	台風22号, 前線
4	2004/10/21	70.0	93.4	107.6	3,729	台風23号, 前線
5	2006/07/19	72.7	126.7	225.8	2,929	梅雨前線
6	2007/09/07	110.0	149.9	258.3	7,756	台風9号

表 2.2 烏・神流川流域における降雨特性

豪雨 番号	生起日	烏・神流川流域平均雨量 (mm)			降雨成因
		12hr	24hr	72hr	
1	2001/09/10	79.2	122.9	218.4	台風15号
2	2002/07/11	89.1	131.4	164.7	台風6号, 梅雨前線
3	2004/10/09	66.1	103.4	117.2	台風22号, 前線
4	2004/10/21	73.7	94.9	106.9	台風23号, 前線
5	2006/07/19	67.1	124.5	232.7	梅雨前線
6	2007/09/07	153.3	216.3	382.0	台風9号

表 2.3 吾妻川流域における降雨特性

豪雨 番号	生起日	吾妻川流域平均雨量 (mm)			降雨成因
		12hr	24hr	72hr	
1	2001/09/10	85.0	140.8	176.2	台風15号
2	2002/07/11	72.9	112.5	136.7	台風6号, 梅雨前線
3	2004/10/09	55.6	84.0	97.8	台風22号, 前線
4	2004/10/21	80.2	106.0	120.0	台風23号, 前線
5	2006/07/19	79.2	140.0	236.0	梅雨前線
6	2007/09/07	97.3	131.1	238.8	台風9号

表 2.4 奥利根流域における降雨特性

豪雨 番号	生起日	奥利根流域平均雨量 (mm)			降雨成因
		12hr	24hr	72hr	
1	2001/09/10	59.0	101.5	121.8	台風15号
2	2002/07/11	97.1	141.5	176.2	台風6号, 梅雨前線
3	2004/10/09	45.5	70.4	82.6	台風22号, 前線
4	2004/10/21	57.2	79.5	94.9	台風23号, 前線
5	2006/07/19	72.8	116.0	208.0	梅雨前線
6	2007/09/07	82.2	109.2	142.0	台風9号

2.2.3 対象豪雨における気象概況²⁾と被害状況³⁾

(1) 豪雨 1

2001 年 9 月に発生した台風 15 号により生じた豪雨である。9 月 4 日に南鳥島付近で発生し、最盛期には 945hPa という強い勢力となっていた。神奈川県鎌倉市付近に 970hPa、最大風速 30m/s の勢力で暴風域を維持したまま上陸した。上陸後は東京都から茨城県を通過して三陸沖へ抜け、9 月 12 日に北海道南海上で温帯低気圧に変わった。9 月 8 日から 9 月 12 日までの期間降水量は、東海から関東地方の山沿いで 600～800mm となるころがあった。また、期間中最大となった利根川上流域 72 時間平均雨量は 175.2mm を記録した。被害状況については、関東地方での被害が特に大きく、死者 5 名、行方不明者 3 名、負傷者 42 名という被害をもたらした。

(2) 豪雨 2

2002 年 7 月発生した台風 6 号とそれに刺激された梅雨前線の影響で生じた豪雨で、全国的に大きな豪雨をもたらした。多くのアメダス観測所で 1 時間の降雨最大記録が更新された。群馬県北部～栃木県北部の山沿いで 7 月 10 日から 11 日までの 48 時間降水量が 300mm を越えた。また、期間中最大となった利根川上流域 72 時間平均雨量は 159.2mm であった。被害状況としては、死者行方不明者 7 名、住家全壊・半壊 39 棟、床上浸水 2,475 棟という被害をもたらした。

(3) 豪雨 3

2004 年 10 月 4 日に発生した台風 22 号が原因で生じた豪雨で、最盛期には 920hPa、50m/s という強い勢力に成長し、東日本に強い勢力 (950hPa、中心付近の最大風速は 40m/s) で上陸した台風である。伊豆半島の石廊崎で最大瞬間風速 67.6m/s という観測史上 1 位の記録を更新している。10 月 7 日から 10 月 9 日までの期間降水量は東海地方から関東南部にかけて 300～400mm を記録している。また、期間中最大となった利根川上流域 72 時間平均雨量は 98.4mm であった。被害状況としては、死者 6 名、行方不明者 2 名、負傷者 167 名という人的被害を受け、住家全壊 135 棟、半壊 287 棟、床上浸水 1,561 棟という被害をもたらした。他にも、駐車中のトラックが横転し積み重なるという被害も発生している。

(4) 豪雨 4

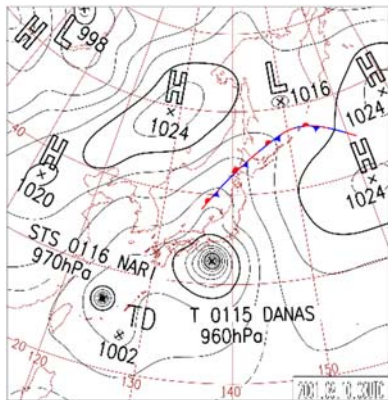
2004 年 10 月 13 日に発生した超大型で強い台風 23 号と台風北側にあった前線の活性化の影響でもたらされた豪雨である。北陸地方、山陰地方、九州北部にわたって最大瞬間風速が上位となっている。10 月 18 日から 10 月 21 日までの期間降水量は、四国で 400～600mm を記録しており、関東地方では 200～300mm であった。また、期間中最大となった利根川上流域 72 時間平均雨量は 107.6mm を記録した。被害状況としては、全国で 98 名の死者・行方不明者が出た平成の台風被害では最多を記録している。また、住家全壊 130 棟、半壊 257 棟、床上浸水 16,474 棟という被害をもたらした。

(5) 豪雨 5

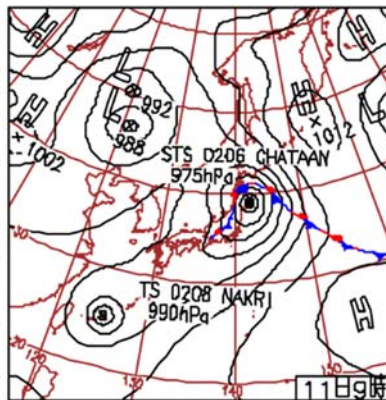
2006 年 7 月豪雨と呼ばれる梅雨前線に伴う豪雨により生じたもので、7 月 15 日から 7 月 24 日までの約 9 日間にわたり梅雨前線が本州から九州にかけて停滞し、各地で記録的な大雨となった。特に九州、山陰、北陸などで記録的な大雨となっている。特に九州地方では、7 月 18 日から 7 月 24 日の期間降水量の多いところで、1,200mm を記録している。関東地方でも、群馬県西部では、期間雨量 600～700mm を記録している。また、期間中最大となった利根川上流域 72 時間平均雨量は 225.8mm を記録した。被害状況としては、死者 32 名、負傷者 64 名、住家全壊 313 棟、半壊 1,457 棟、床上浸水 1,980 棟という被害がもたらされた。

(6) 豪雨 6

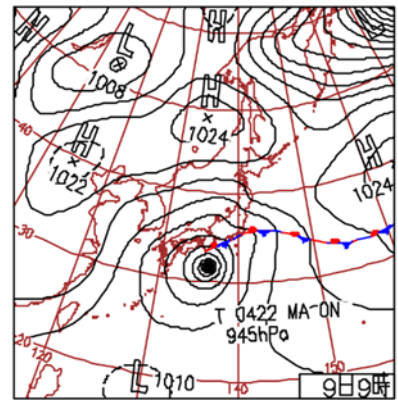
2007 年 9 月に発生した台風第 9 号が原因で生じた豪雨で、この台風は首都圏を直撃して東日本を縦断した台風である。最盛期の中心気圧は 965hPa であり、最盛期に近い勢力で静岡県に上陸した。自転車並みの遅い進行速度で本土に接近したため、台風の影響を受けた地域は長時間暴風雨にさらされた。特に関東地方に大きな被害をもたらした。9 月 5 日から 9 日までの期間雨量は、関東・甲信越地方で 600mm を超えた。また、期間中最大となった利根川上流域 72 時間平均雨量は 258.3mm であった。被害状況については、死者 1 名、行方不明者 2 名という被害をもたらした。



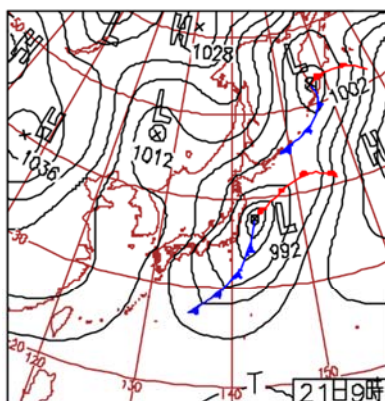
(a) 豪雨 1:2001. 09. 10



(b) 豪雨 2:2002. 07. 11

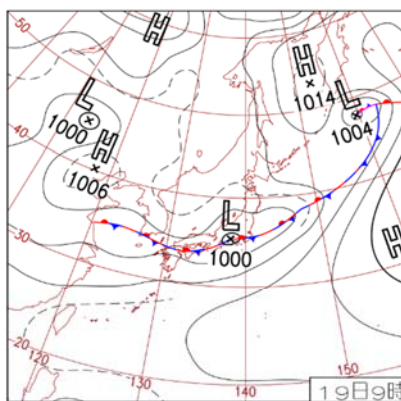


(c) 豪雨 3:2004. 10. 09



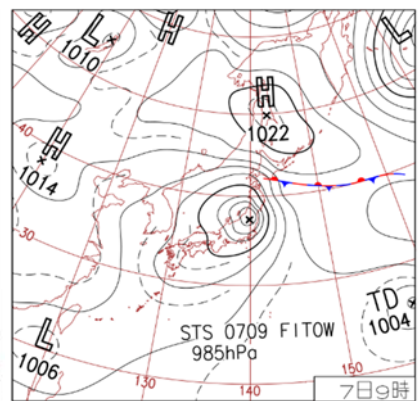
21日(木)富士山 初冠雪
台風第23号から変わった低気圧の影響で東北～関東は雨、海上は大しけが続く。西日本や南西諸島は乾燥した空気が入り台風一過の晴れ。富士山は、平年より20日遅く初冠雪。

(d) 豪雨 4:2004. 10. 21



19日(水)土砂災害相次ぐ
活発な梅雨前線の影響で東・西日本大雨が続く。長野県岡谷市で土石流、天竜川の堤防決壊、熊本県、京都府、静岡県、栃木県でもがけ崩れ発生。マリアナ諸島付近で台風第5号発生。

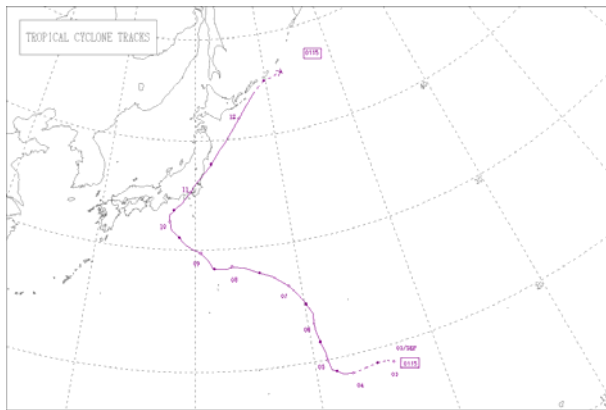
(e) 豪雨 5:2006. 07. 19



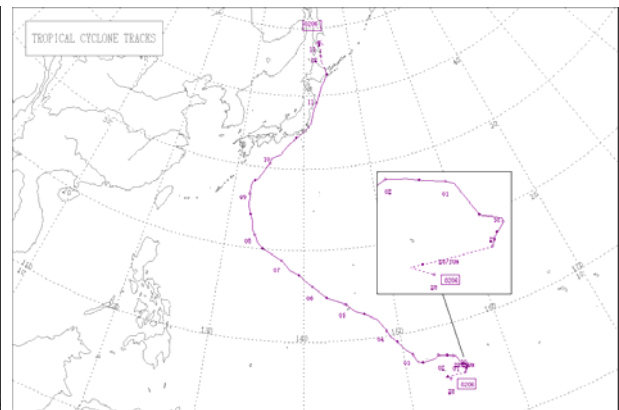
7日(金)台風、東海～東北を縦断
台風第9号は午前0時頃に伊豆半島南部に上陸し、午後には東北地方へ。静岡県や関東の山沿いで500mm/24hを超える大雨。各地の河川ははん濫、首都圏は交通に乱れ。

(f) 豪雨 6:2007. 09. 07

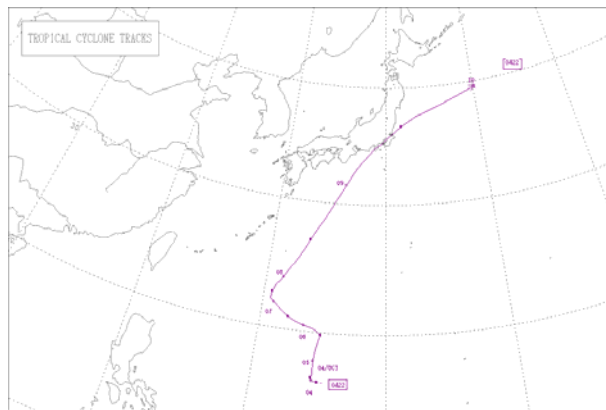
図 2.2 豪雨生起日の気象庁地上天気図 ⁴⁾⁵⁾



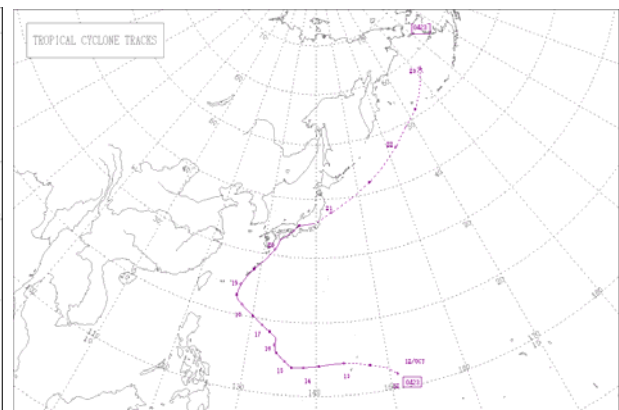
2001 年 台風 15 号 (豪雨 1)



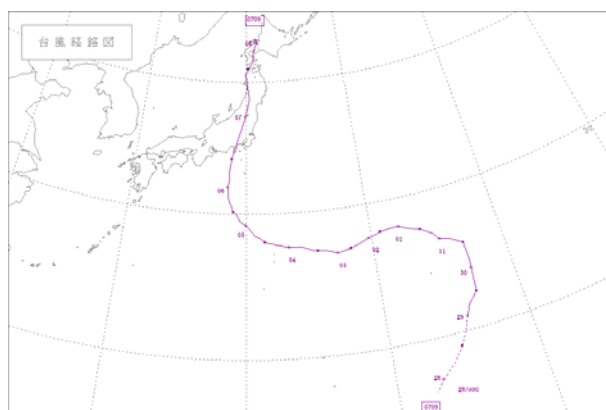
2002 年 台風 6 号 (豪雨 2)



2004 年 台風 22 号 (豪雨 3)



2004 年 台風 23 号 (豪雨 4)



2007 年 台風 9 号 (豪雨 6)

図 2.3 検討対象豪雨の台風経路図²⁾

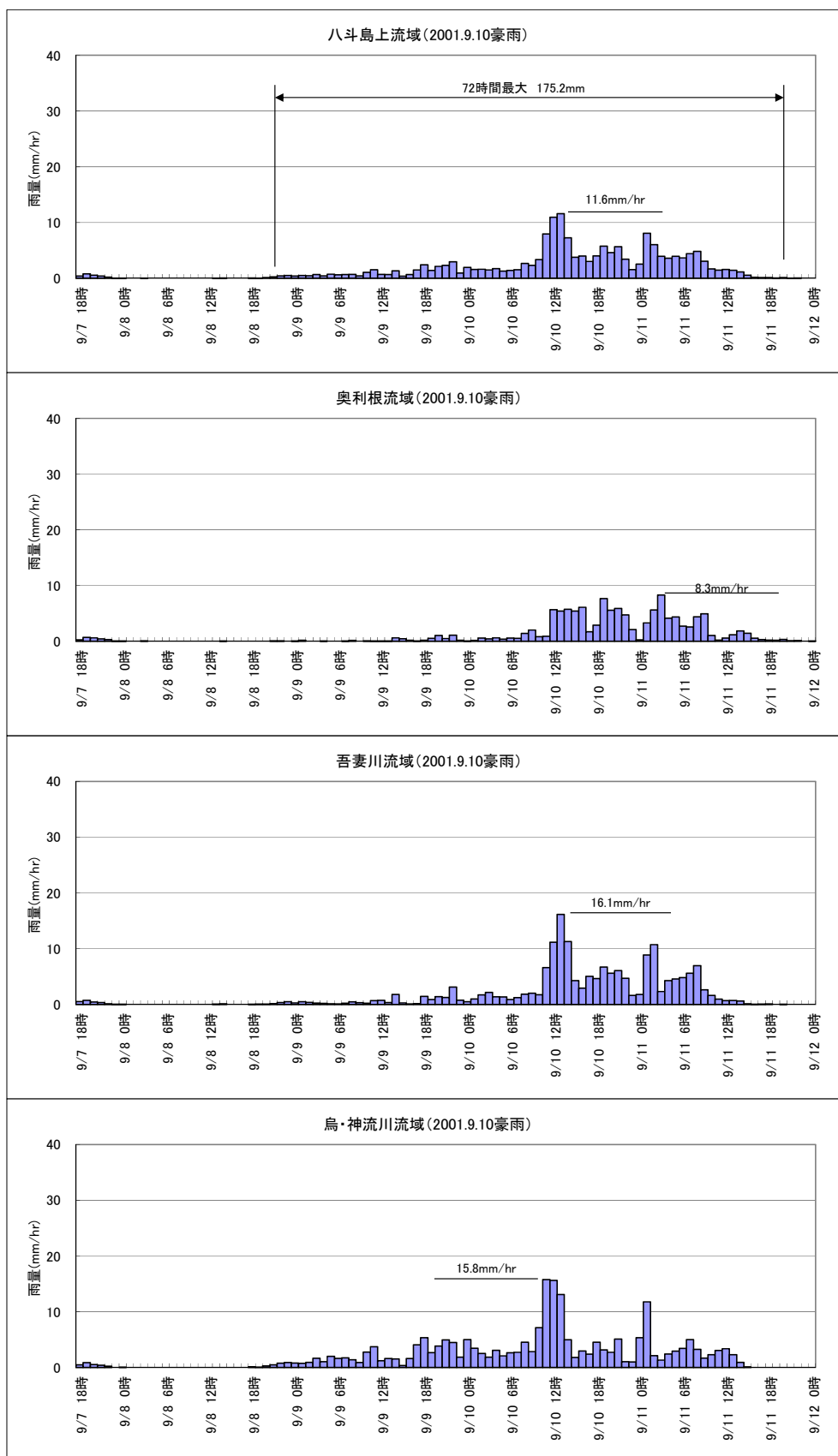


図 2.4 八斗島上流および小流域平均時間分布（豪雨1 2001.9.10）

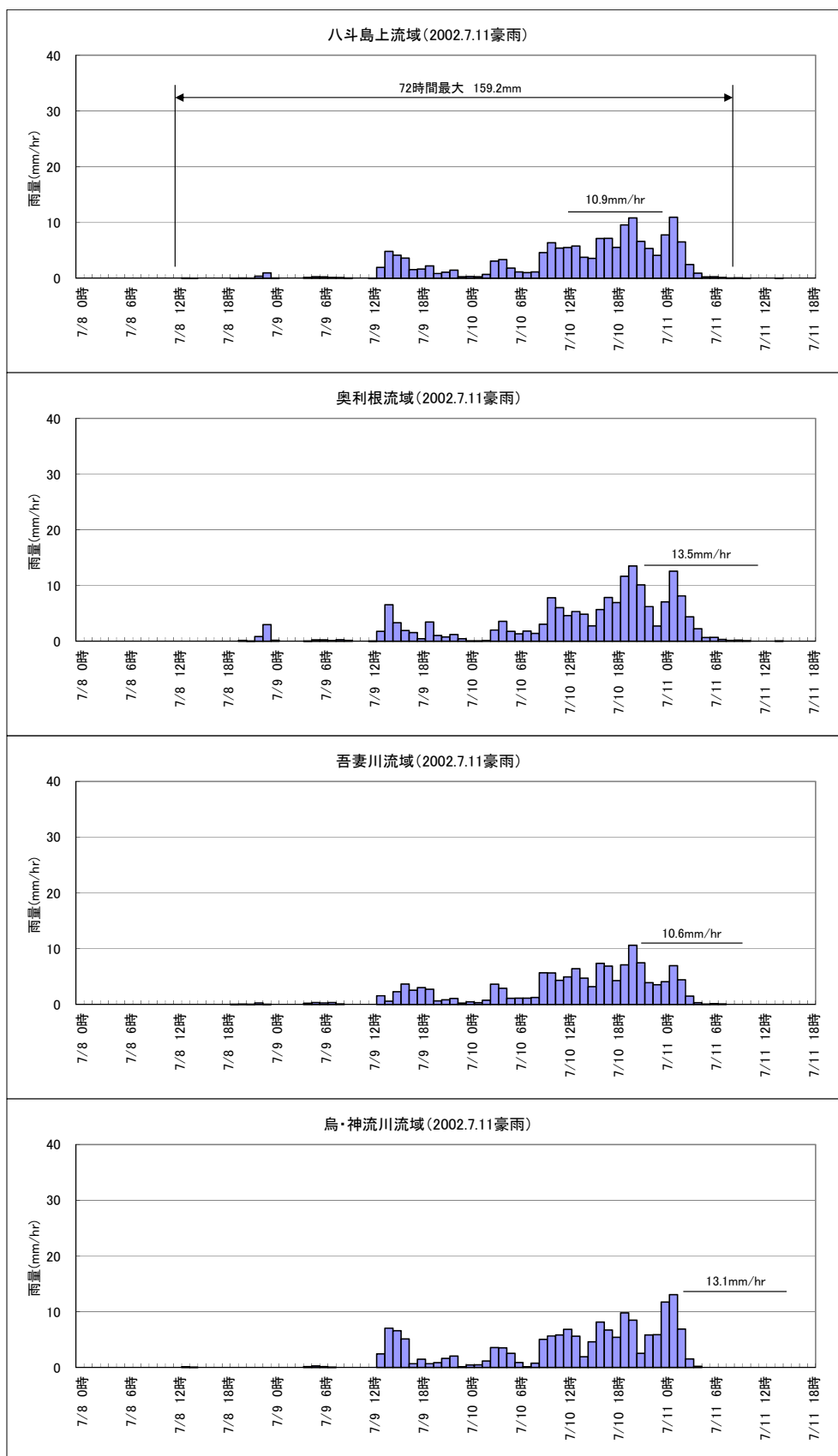


図 2.5 八斗島上流および小流域平均時間分布（豪雨2 2002.7.11）

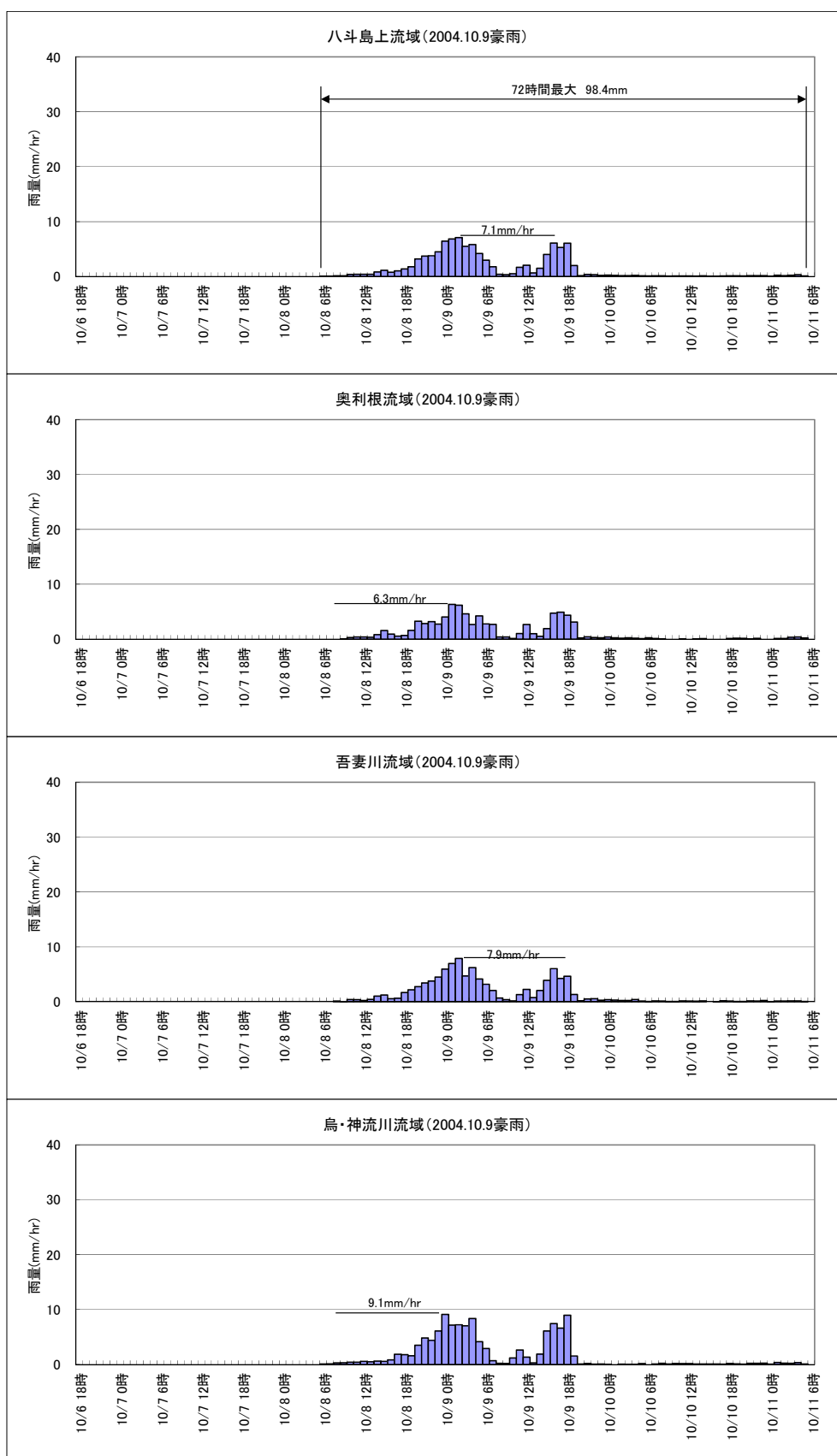


図 2.6 八斗島上流および小流域平均時間分布（豪雨3 2004.10.9）

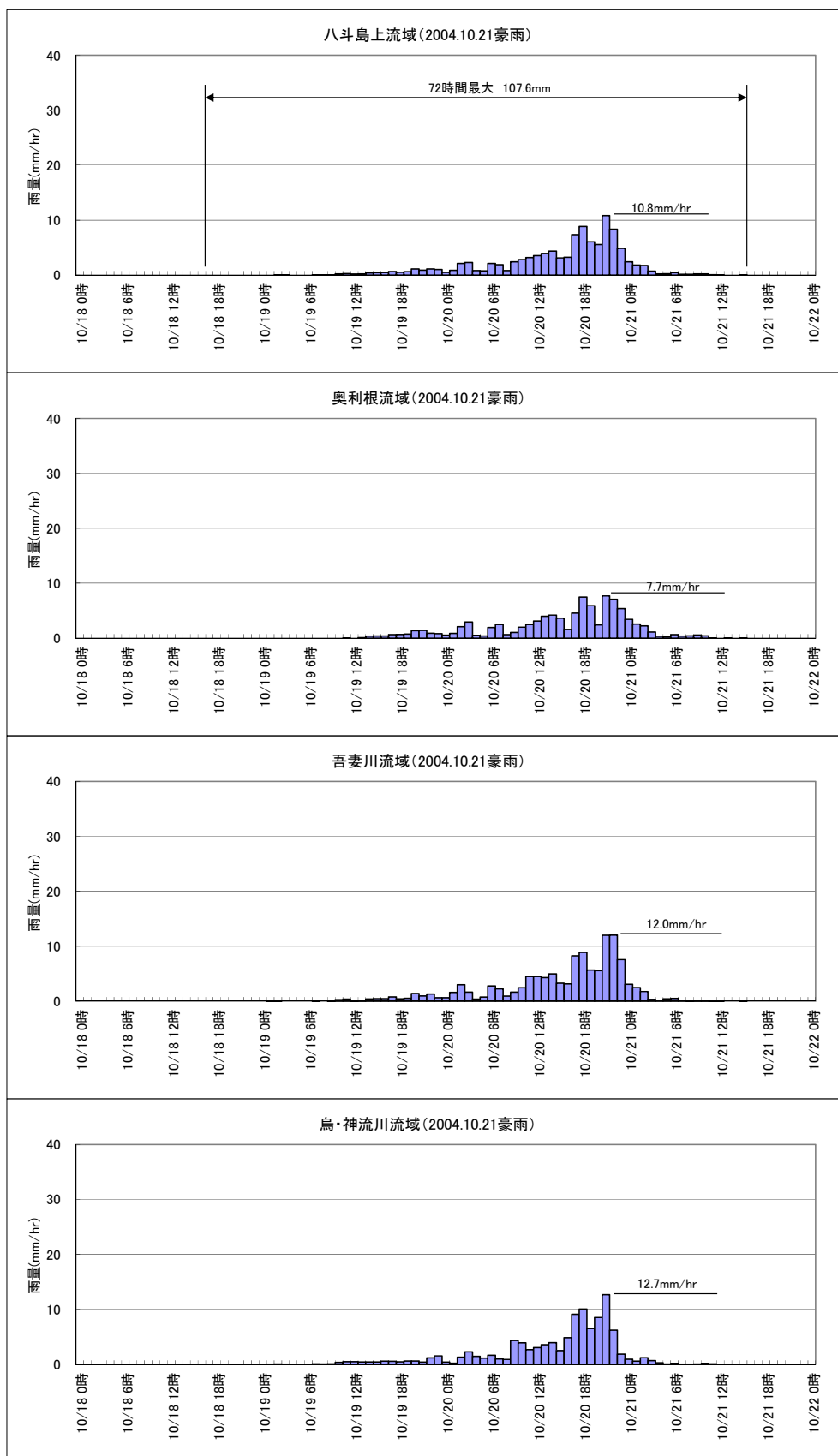


図 2.7 八斗島上流および小流域平均時間分布（豪雨4 2004. 10. 21）

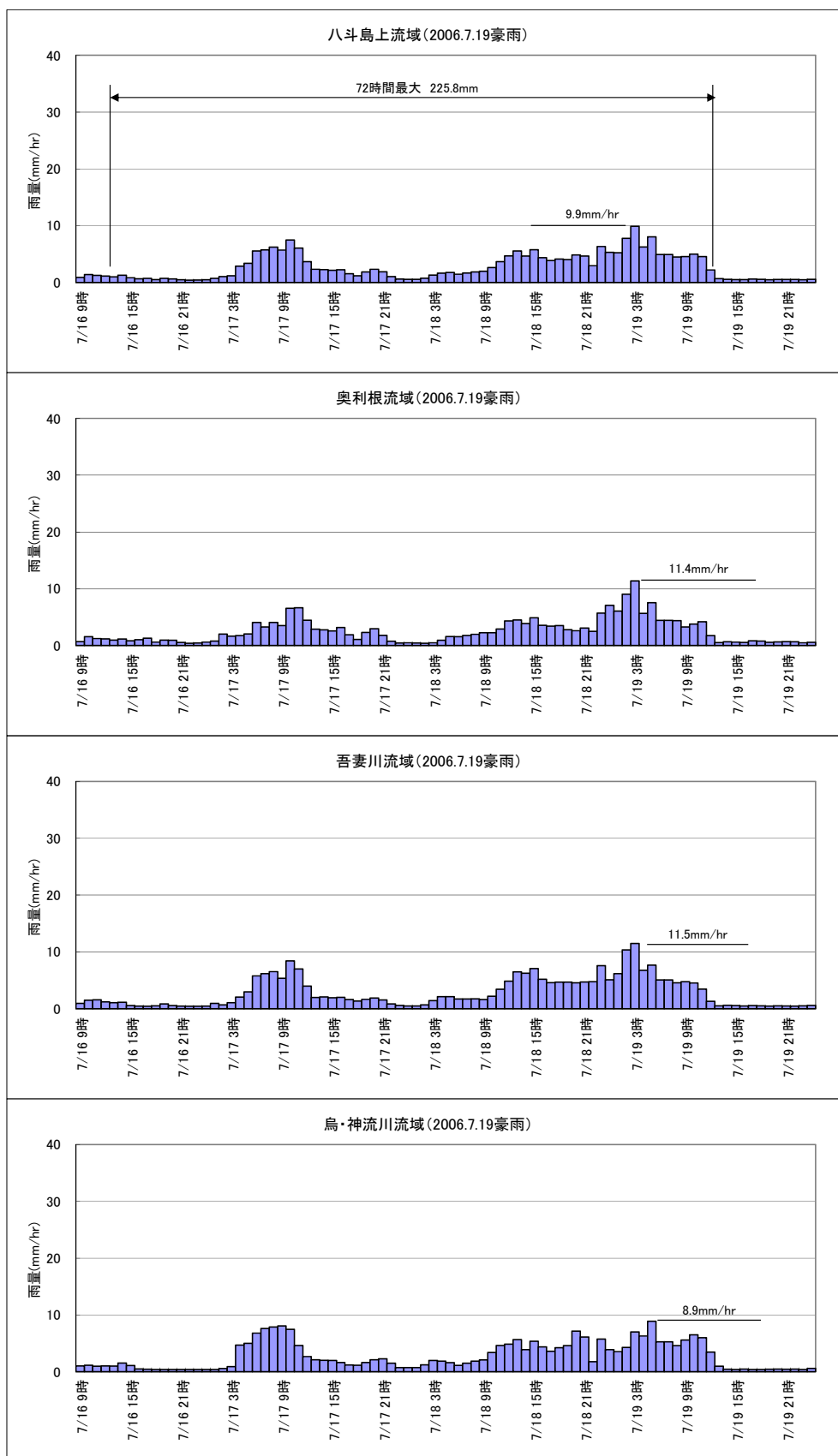


図 2.8 八斗島上流および小流域平均時間分布（豪雨5 2006.7.19）

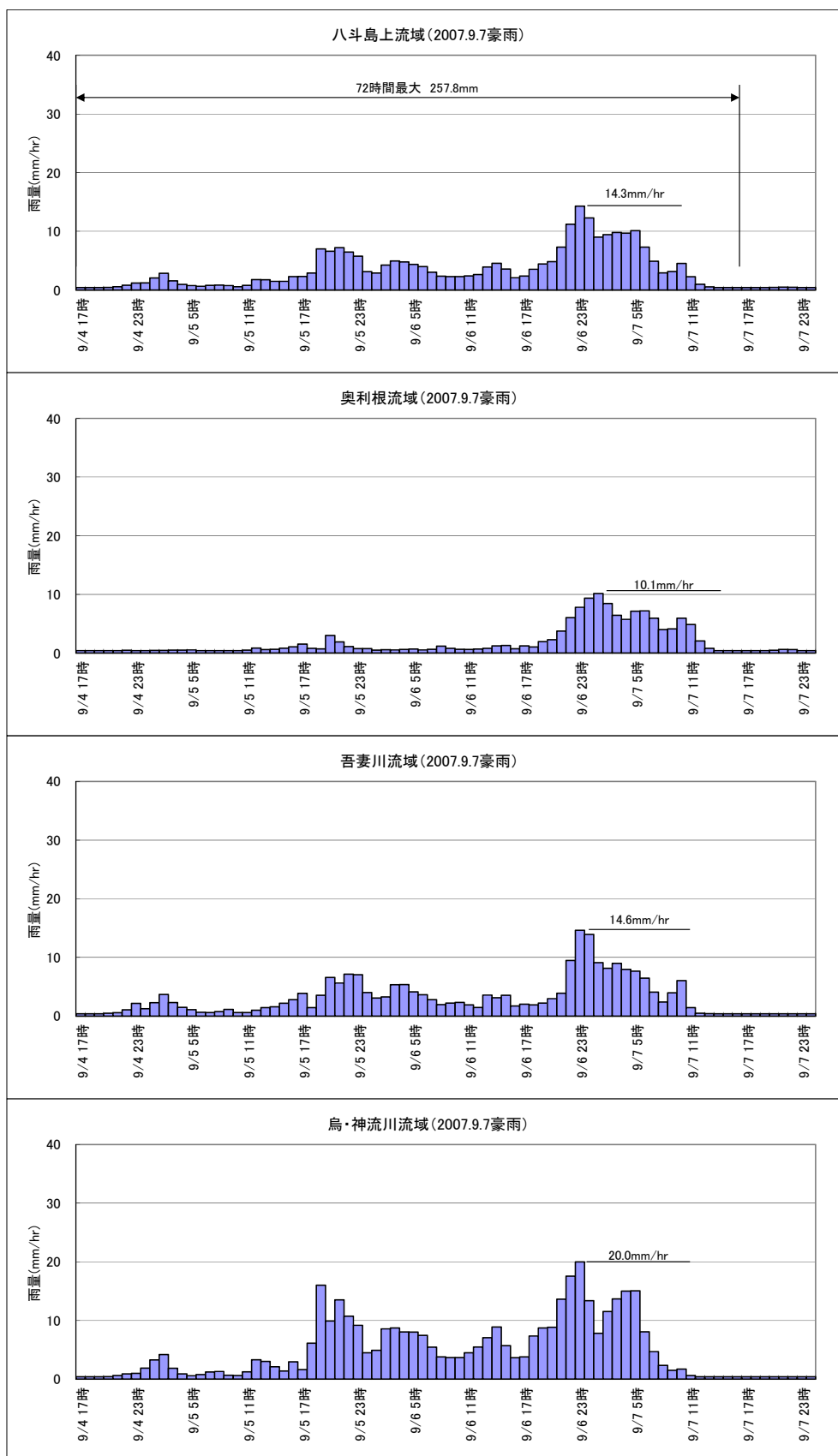


図 2.9 八斗島上流および小流域平均時間分布（豪雨 6 2007. 9. 7）

最大72時間雨量
2001. 09. 10

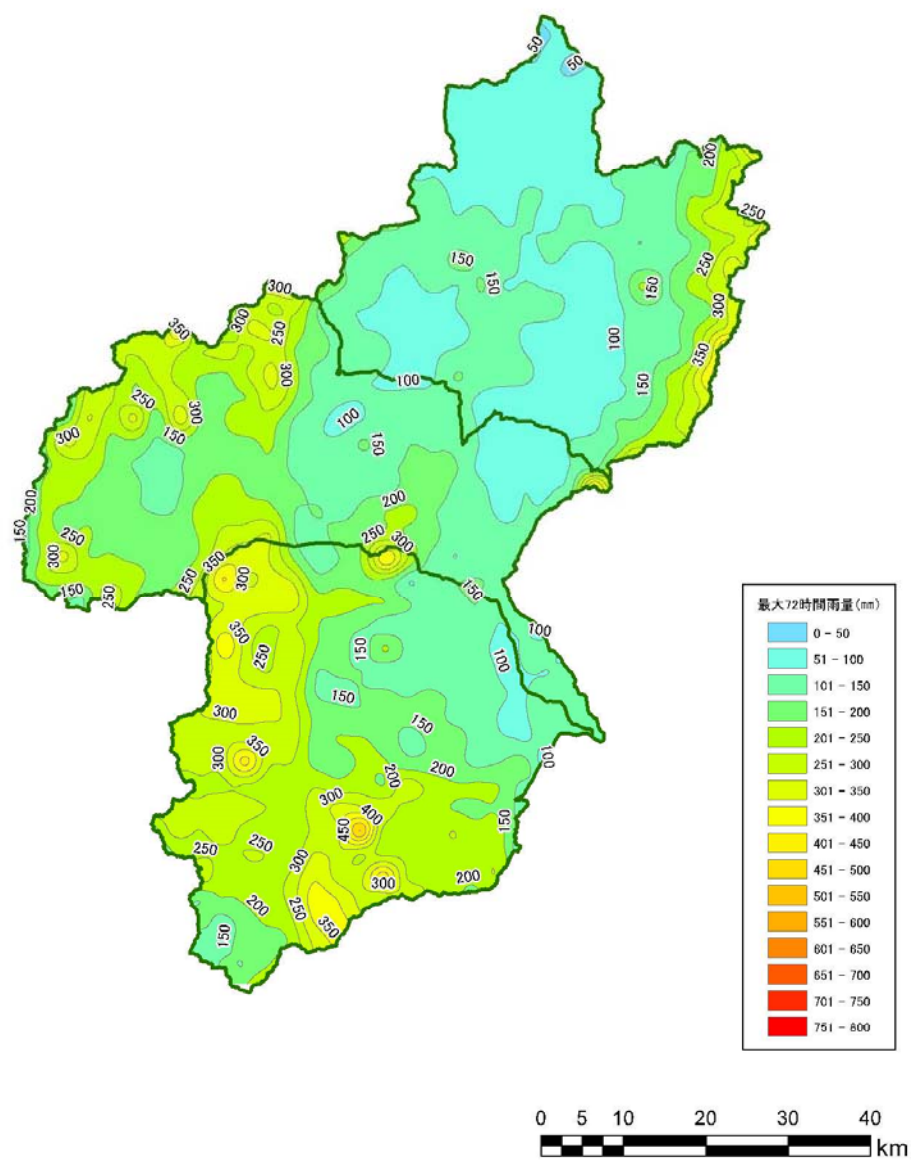


図 2.10 八斗島上流域最大 72 時間雨量の空間分布 (豪雨 1 2001. 09. 10)

最大72時間雨量
2002. 07. 11

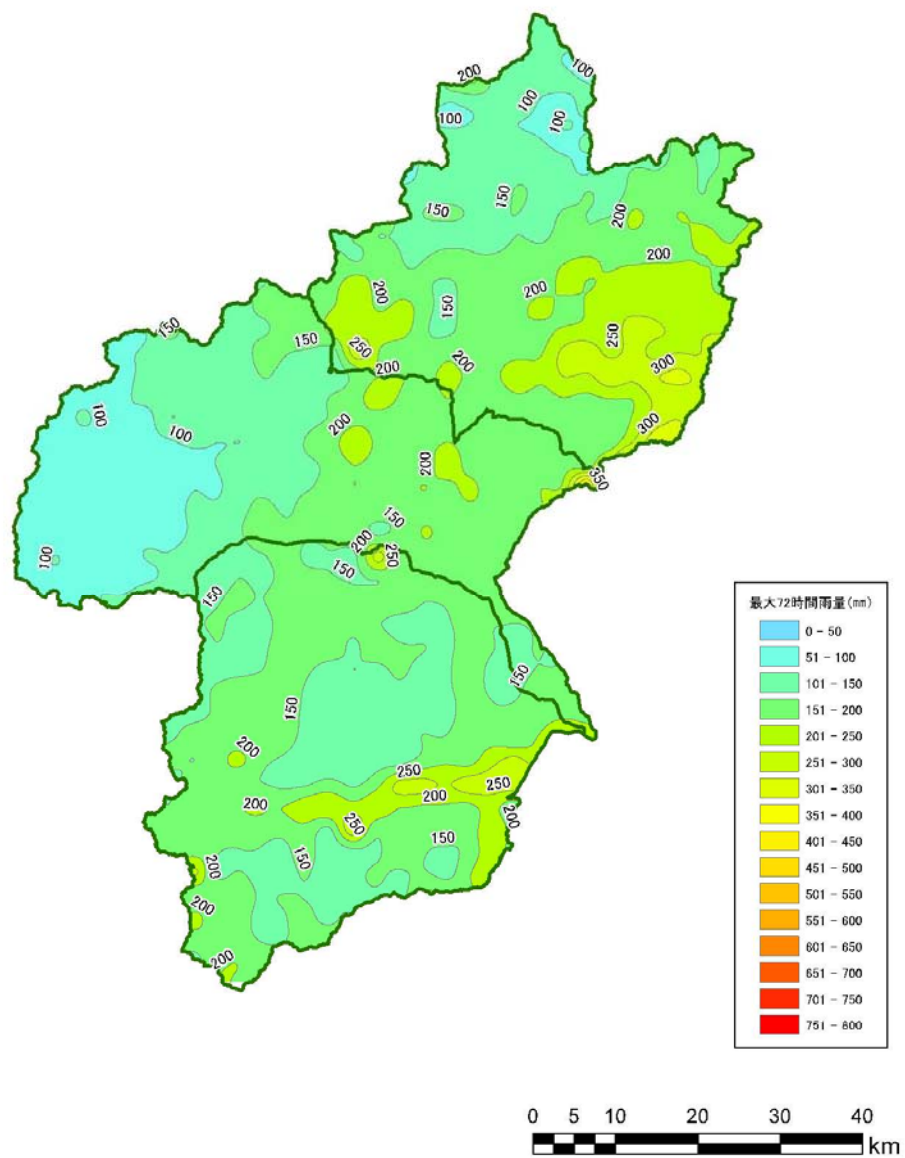


図 2.11 八斗島上流域最大 72 時間雨量の空間分布 (豪雨 2 2002. 07. 11)

最大72時間雨量
2004. 10. 09

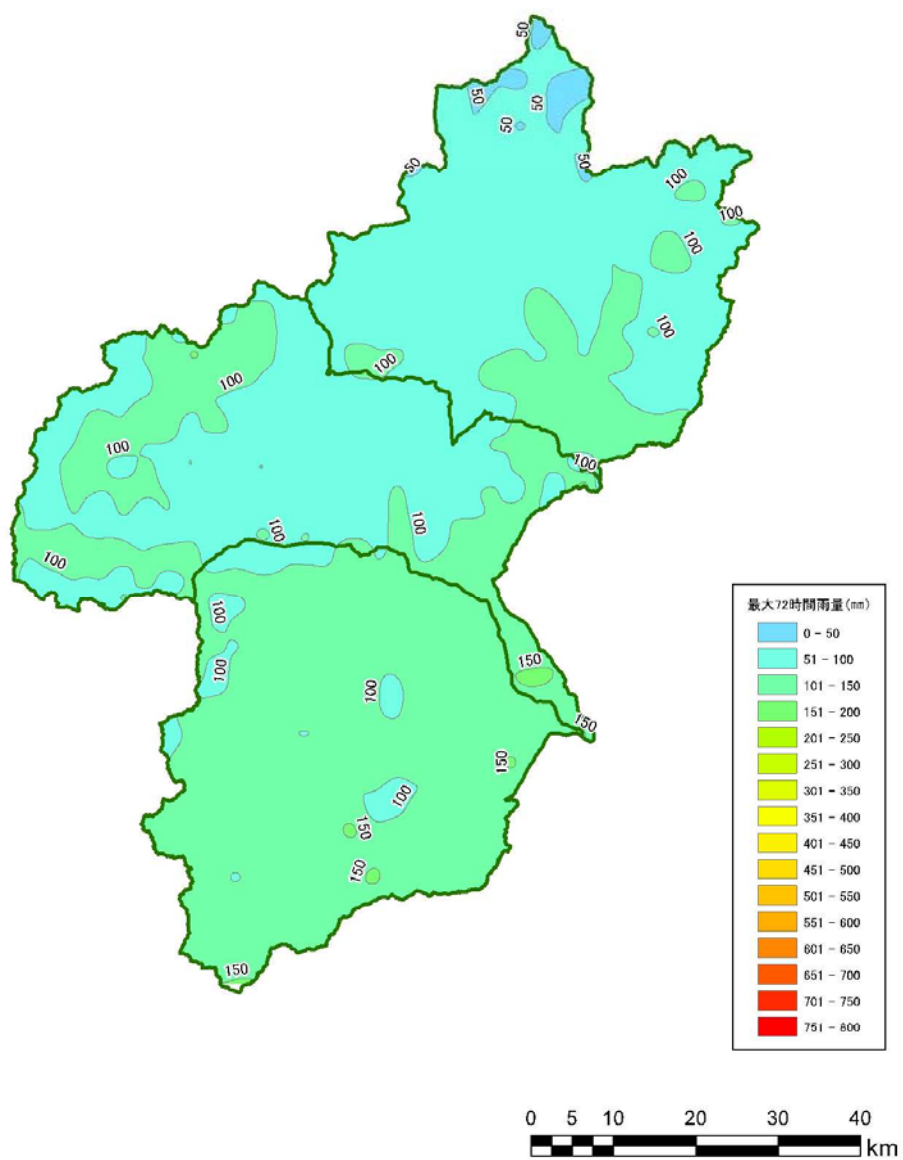


図 2.12 八斗島上流域最大 72 時間雨量の空間分布 (豪雨 3 2004. 10. 09)

最大72時間雨量
2004. 10. 21

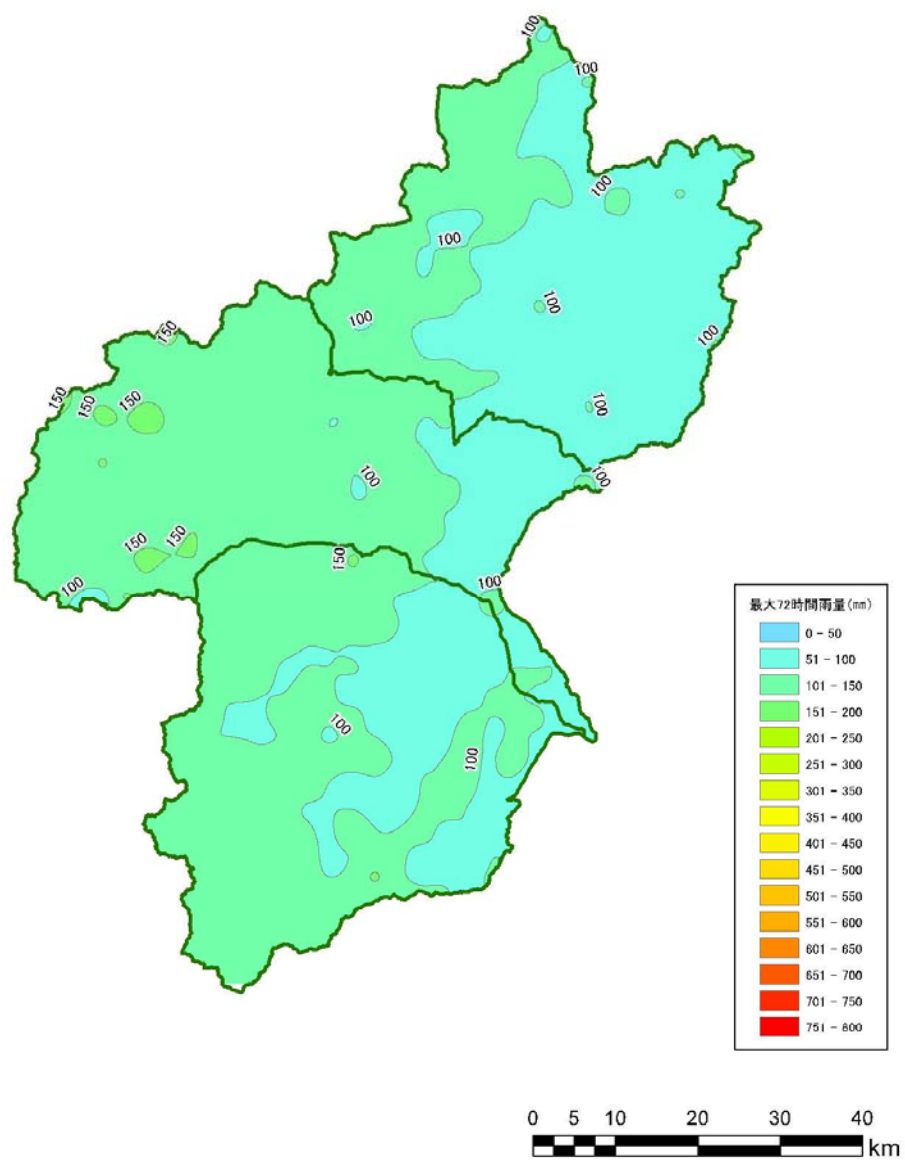


図 2.13 八斗島上流域最大 72 時間雨量の空間分布 (豪雨 4 2004. 10. 21)

最大72時間雨量
2006. 07. 19

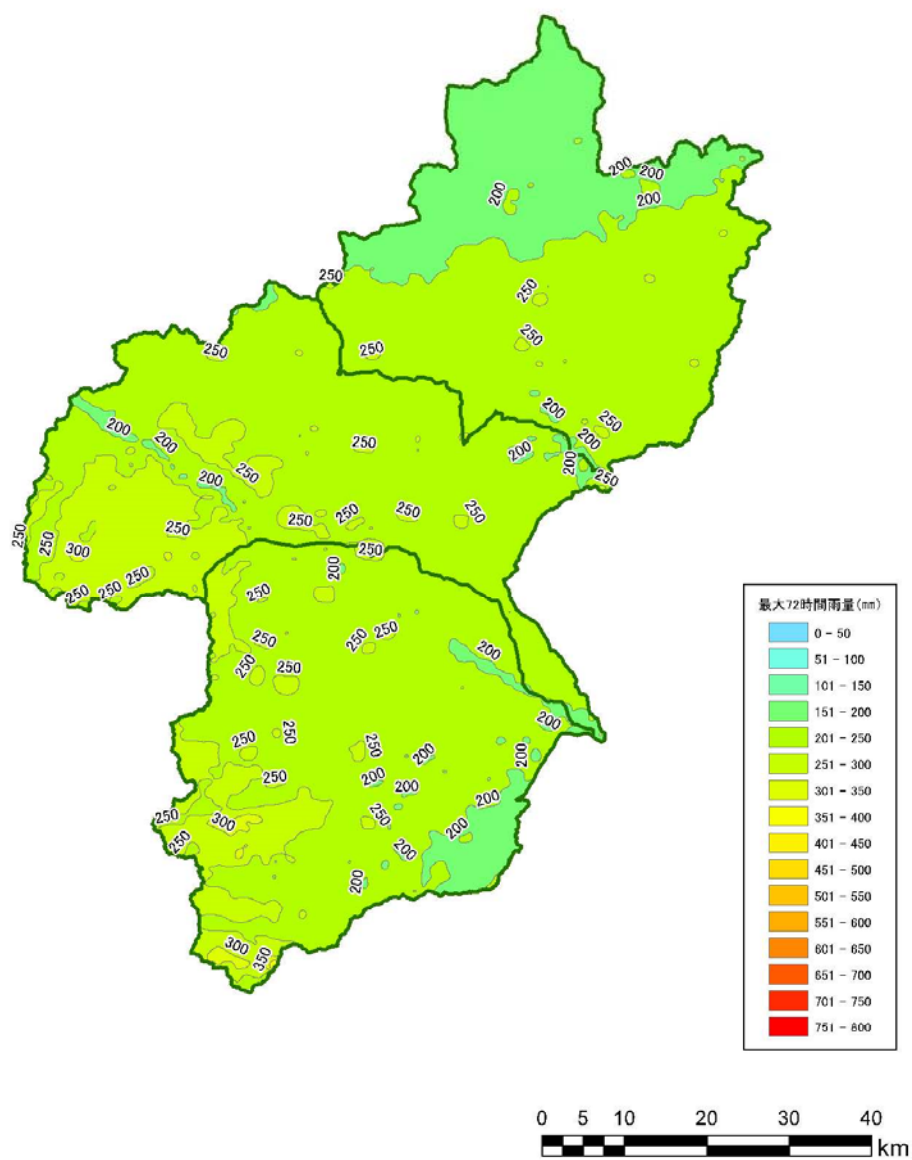


図 2.14 八斗島上流域最大 72 時間雨量の空間分布 (豪雨 5 2006. 07. 19)

最大72時間雨量
2007. 09. 07

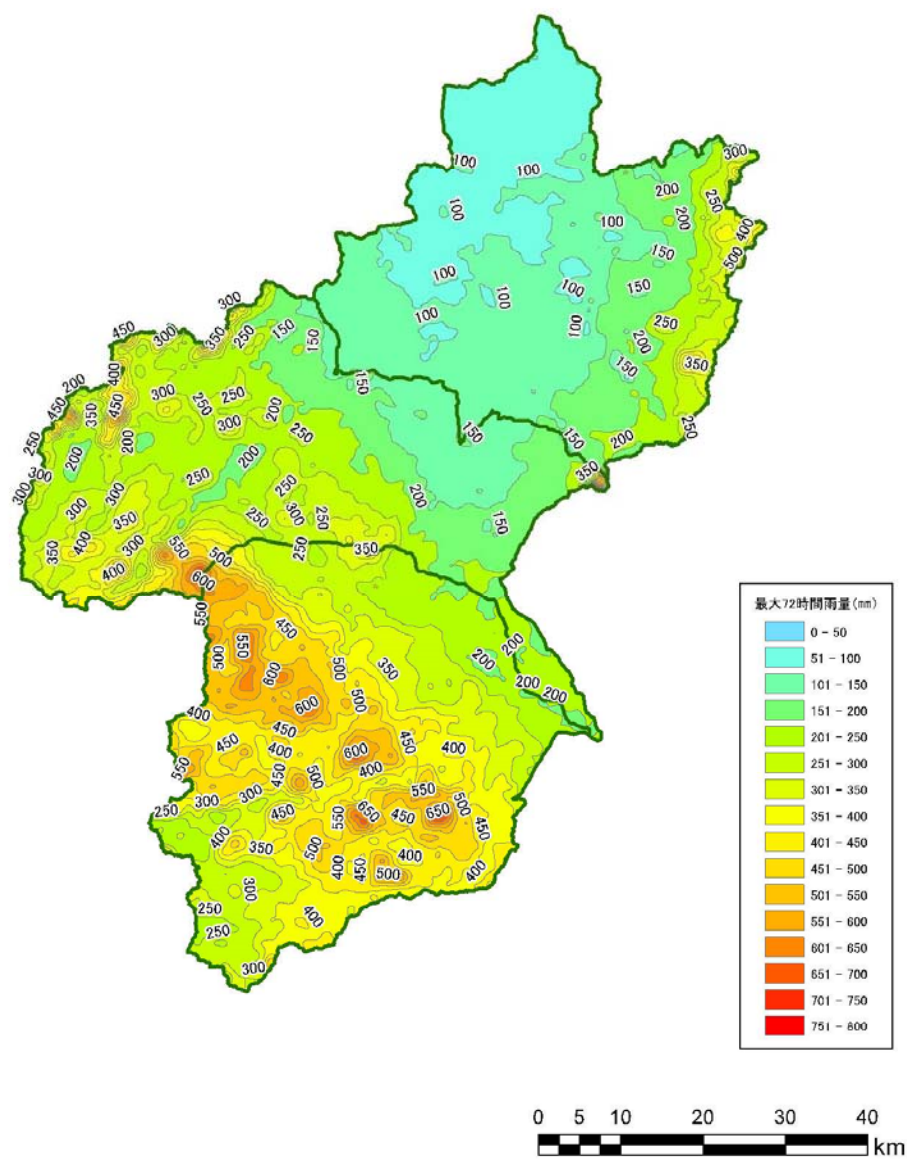


図 2.15 八斗島上流域最大 72 時間雨量の空間分布 (豪雨 6 2007. 09. 07)

第2章の参考文献

- 1) 国土交通省：水管理・国土保全局:利根川水系河川整備基本方針資料，2006.
- 2) 気象庁：気象庁，災害をもたらした気象事例，
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/index_1989.html (2015 年 7 月現在).
- 3) 内閣府：防災白書，2002～2008 年度版.
- 4) 気象庁：気象庁天気図 (CD-ROM).
- 5) 気象庁：気象庁，日々の天気図，
<http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/index.html> (2015 年 7 月現在).

第3章 気象モデルによる実績豪雨の再現性

3.1 概説

本研究においては、気象条件の変化と降雨の物理的な関係を把握し、気象条件の最大化による可能最大降水量(PMP)、および、可能最大洪水(PMF)の推定を行う。このためには実績豪雨に対して再現性の高いモデルを構築し、気象条件の変化による降雨量、時間分布、空間分布等の変化を把握することが必要である。

本章では、気象モデルを用い、前章において検討対象豪雨として選定した6豪雨を対象として再現計算を行う。気象モデルとしては近年メソ気象を対象として多く用いられている WRF (Weather Research and Forecasting model) を用いることとし、再現計算に用いる計算条件として、雨量データ、客観解析データ、標高データなどについて用いるデータとその概要を述べる。次に、WRF を用いた実績豪雨の再現方法について、対象領域とネスティング方法、メッシュサイズ、初期条件、境界条件などについて説明する。再現計算については、まず、WRF の雲微物理、積雲対流、大気境界層、長波放射、短波放射等の物理パラメタリゼーションについて、対象流域である利根川流域における最適な物理パラメタリゼーションを比較検討により設定する。次に、設定した条件を用いて対象6豪雨の再現計算を行い、72時間降雨量、ピーク時間雨量、ピーク雨量発生時刻などを比較するとともに時間分布、空間分布等について比較を行う。その結果から、気象モデル WRF を用いた利根川八斗島上流域における豪雨の再現性について考察する。

3.2 計算モデルと計算条件

3.2.1 気象モデル WRF について

気象モデル WRF¹⁾は、非静力学気象モデルで、MM5 の後継モデルといわれている。気象モデル WRF も MM5 と同様にホームページ上でソースコードが無償配布されており、現業用・研究用両用のメソモデルとして開発が進められている。気象モデル WRF は米国国立気象研究センター (NCAR)、米国海洋大気庁 (NOAA) の関連機関である地質調査局 (CSD)、米国立環境予測センター (NCEP)、環境モデリングセンター (EMC) を中心として、空軍気象局 (AFWA)、連邦航空局 (FAA)、海軍総合科学研究所 (NRL) と協力して開発が進められている。また、米国および海外の大学や政府機関とも共同で研究が進められている。

現在、WRF は、ARW (The Advanced Research WRF) と NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model) の2つの解析方法から選択することができる。ARW は NCAR の MMM (Mesoscale and Microscale Meteorology) を中心としてユーザーに対するサポート、開発が行われている研究目的のものである。それに対して、NMM は NCEP によって開発され、DTC (Developmental Testbed Center) によってサポートされている現業用に開発されたものである。本研究では、研究目的で使うことから ARW を用いて計算を行った。ARW は大気物理学、パラメータ解析に関する研究やリアルタイムの数値予報と予測システムの研究などに用いられている。また、ARW はその他に地域の気候に関する研究など多種・多様に用いられている。さらに ARW は実際のデータもしくは理想化されたケースの両方に対応できる。また、研究グループにより優れた手法・データ等が提供

されている。現在、WRFはNCEPやAFWAのほかにも、大気に関する研究を行っている科学者や天候を予測・予報する様々な機関によって利用されている。

モデルの構成²⁾としては図 3.1 に示すように、WPS (WRF Pre-Processing System) という前処理ソフトを使用し、実数値予報データの補間などを行い、WRF で計算されることができるデータを作成する。その後、WRF モデルを用いて、初期値・境界値を作成し計算させ、理想的なケースのシミュレーション、あるいは、実際のケースのシミュレーションを行う。WRF を用いて計算させたデータを可視化ソフトを用いて図化する。WPS の具体的な機能としては、図 3.2 に示すように、処理プログラム geogrid を用いてシミュレーションを行う領域での地形、土地利用、土壌形式などの静的データを作成する。次に、処理プログラム ungrib を用いて、気温、湿度、風速、表面圧力、土壌、積雪、海面温度等の GRIB 形式の気象データの解凍を行う。そして最後に、処理プログラム metgrid を用いて、geogrid と ungrib で作成したデータを自分のシミュレーションを行う領域に補完・統合し、WRF への入力データを作成する。

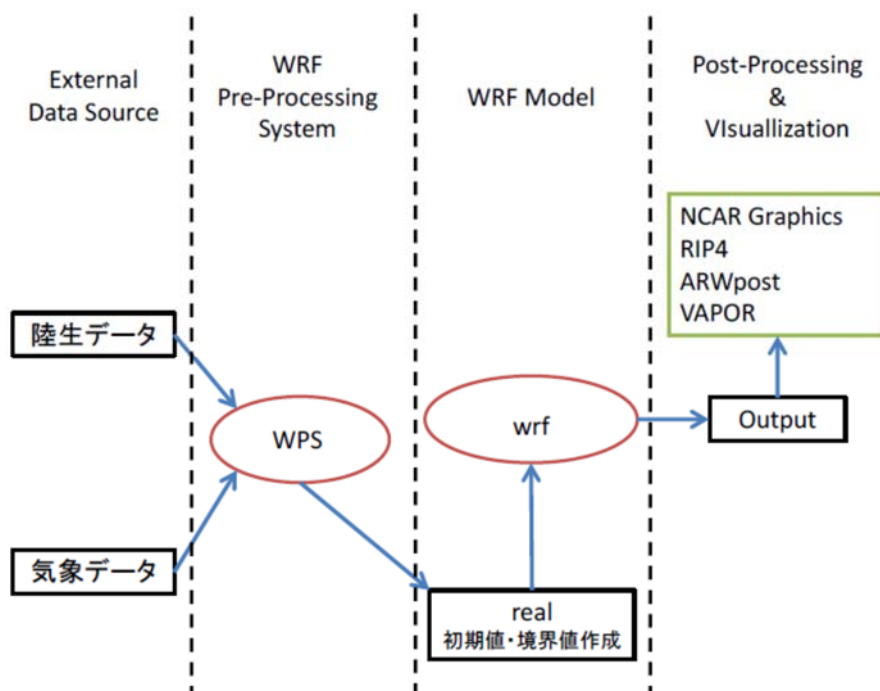


図 3.1 WRF 計算フロー

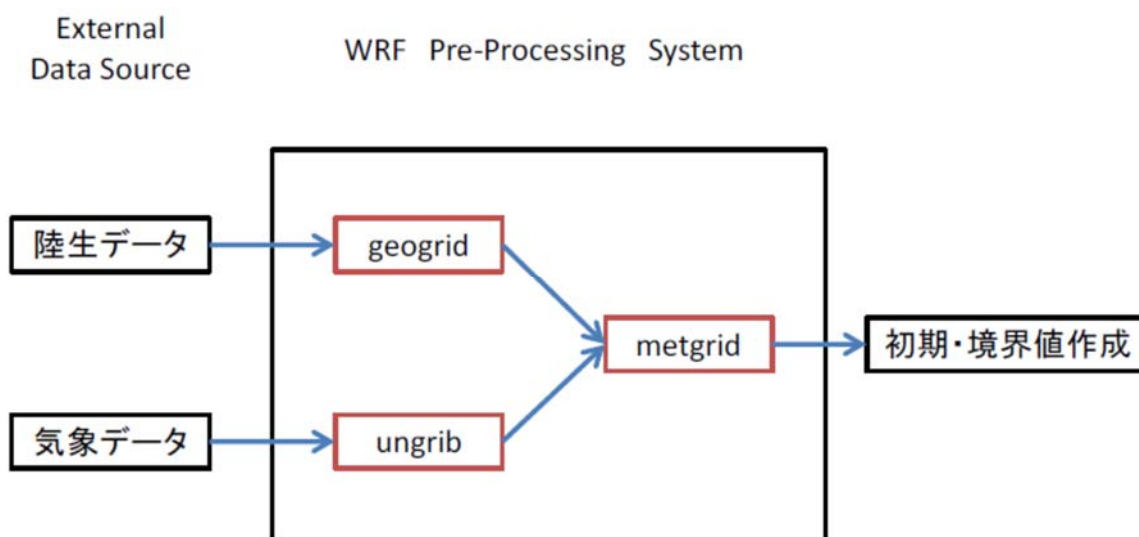


図 3.2 WPS 計算フロー

3.2.2 WRF のモデルの概要

(1) 支配方程式の鉛直座標系

WRF は，地形に沿った η 座標系(図 3.3)をとり，式(3.1)および(3.2)で表される．

$$\eta = \frac{(p_h - p_{ht})}{\mu} \quad (3.1)$$

$$\mu = p_{hs} - p_{ht} \quad (3.2)$$

ここで， p_h ：圧力の静水圧成分， p_{hs} ：計算範囲上端の気圧， p_{ht} ：地上気圧， μ ：空気の単位面積質量である．この座標系でのフラックス形式の各変数は以下のように表される．

$$\mathbf{V} = \mu \mathbf{v} = (U, V, W) \quad , \quad \Omega = \mu \dot{\eta} \quad , \quad \Theta = \mu \theta \quad , \quad \omega = \dot{\eta}$$

ここで， $\mathbf{V} = (U, V, W)$ ：運動量フラックス(U, V, W は東西，南北，鉛直成分)， $\mathbf{v} = (u, v, w)$ ：風速の東西，南北，鉛直成分， Ω ： η 座標系における鉛直方向の運動量フラックス， Θ ：温位フラックス， θ ：温位， $\omega = \dot{\eta}$ ： η 座標系における鉛直風である．その他，WRF の支配方程式で保存されない変数として $\varphi = gz$ ：ジオポテンシャル， p ：気圧， α ：比容($= 1/\rho$ ， ρ ：空気の密度)がある．これ以降， η 座標系における方程式は式(3.3)～(3.10)で表される．

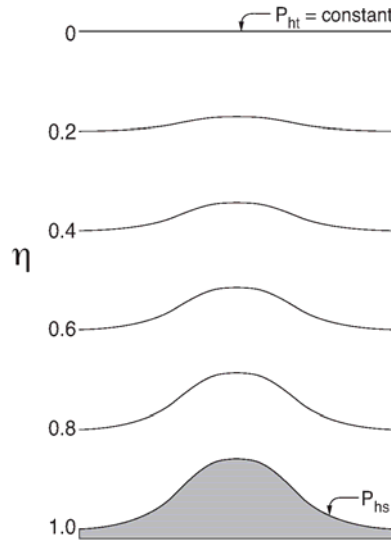


図 3.3 ARW η 座標系

(2) オイラー方程式

フラックス形式のオイラー方程式は、以下のように表される．(3.3) ～ (3.5) 式が運動方程式，(3.6) 式が温位保存式，(3.7) 式が質量保存則，(3.8) がジオポテンシャル式を表している．

$$\partial_t U + (\nabla \cdot \mathbf{V}_u) - \partial_x(p\varphi_\eta) + \partial_\eta(p\varphi_x) = F_U \quad (3.3)$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot \mathbf{V}_v) - \partial_y(p\varphi_\eta) + \partial_\eta(p\varphi_y) = F_V \quad (3.4)$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot \mathbf{V}_w) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_W \quad (3.5)$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot \mathbf{V}_\theta) = F_\Theta \quad (3.6)$$

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot \mathbf{V}) = 0 \quad (3.7)$$

$$\partial_t \varphi + \mu^{-1}[(\mathbf{V} \cdot \nabla \varphi - gW)] = 0 \quad (3.8)$$

ここに、 ∂ の添え字 t は偏微分を、 \mathbf{V} の添え字 u, v, w はそれぞれの方向の運動量フラックスを、 ∇ はナブラで U, V, W それぞれの方向のベクトルの偏微分をつけたものである．

静力学平衡式は、

$$\partial_\eta \varphi = -\alpha \mu \quad (3.9)$$

また、状態方程式は、以下の式で表される．

$$p = p_0(R_d \theta / p_0 \alpha)^\gamma \quad (3.10)$$

∂ の添え字 x, y, η は偏微分を表している．また、 a を一般的な変数とすると、

$$\nabla \cdot \mathbf{V}_a = \partial_x(Ua) + \partial_y(Va) + \partial_\eta(\Omega a)$$

$$\mathbf{V} \cdot \nabla a = U \partial_x a + V \partial_y a + \Omega \partial_\eta a$$

となる．ここで、 γ ：乾燥空気の定圧比熱と定積比熱の比 ($= c_p/c_v = 1.4$)， R_d ：乾燥空気の気体定数 ($= 287.0\text{J/kg/K}$)， p_0 ：基準圧力 ($= 1,000\text{hPa}$) である．また、各式の右辺の F_U, F_V, F_W, F_Θ はコリオリ力，屈曲項，乱流拡散，物理過程による外力を表す項である．

(3) 微物理過程

1) 雲微物理スキーム

豪雨をもたらす、その大気場を構成しているのは積乱雲である．雲微物理モデルは、積乱雲の構造、発生・発達メカニズムを表現するために使用されるパラメタリゼーションである．雲微物理モデルでは、大気中の雲を対象とし水蒸気、雲水、雲氷、雨水、雪、あられ、雹で表現されている水物質間の相変化、成長や水物質の落下などを表現している．

a) WSM 3-class simple ice scheme

1989 年に Dudhia によって開発されたスキーム³⁾である。雲を構成する降水粒子に水蒸気、雲水、雲氷の 3 つの混合比を考慮することから WSM3 スキームと呼ばれている。雲水と雲氷、もしくは落下する雨粒が水か雪かの判断に密度を使用する。段階的に氷が溶けることや過冷却水への考慮が不足しているという欠点がある。

b) Morrison 2-moment scheme

2005 年に Morrison によって開発されたスキーム⁴⁾であり、雲を構成する降水粒子に水蒸気、雲水、雨水、雲氷、雪、あられの 6 つの混合比と、雨水、雲氷、雪、あられの数密度を考慮する。

c) Thompson graupel scheme

1998 年に Reisner によって開発されたもの⁵⁾を 2004 年に Thompson が改良したスキーム⁶⁾であり、雲を構成する降水粒子に水蒸気、雲水、雲氷、雨水、雪、あられ、雹を考慮し、さらに、雲氷と雨水の数密度も考慮している。

d) WSM 6-class graupel scheme⁷⁾

WSM3 スキームで課題となっていた過冷却水と、雪が段階的に溶解する過程を改善した WSM5 をさらに改良したスキームである。雲を構成する降水粒子に水蒸気、雲水、雨水、雲氷、雪、あられの 6 つの混合比を考慮している。雪やあられが溶けることによる混合段階を表す方法が導入されている。これは、雪やあられの落下速度を混合比率に依存させることと落下速度を堆積・累積のプロセスに適用することにより雪からあられの変化を表している。

2) 大気境界層スキーム⁸⁾

大気境界層とは、地表面の摩擦の影響を多分に受ける下層大気のことである。この大気境界層は、我々の生活の場であり、大気汚染物質の輸送、都市の豪雨時の水蒸気の集積などの役割を果たす。また、熱、水蒸気、物質などを地表面付近から自由大気へ輸送し、地球規模の大気現象に影響も与える。大気境界層スキームは、大気が不安定となった際に発生する大気混合層を表現するために使用される。

a) YSU scheme

韓国の延世大学の Hong によって開発されたスキーム⁹⁾である。MRF scheme の逆転層の乱気流拡散方程式に潜在的なフラックス項を追加することにより精度を高めたものである。MRF scheme の問題であった強い風による大気境界層の急速な発達を抑制し、また、冷たい海の上や谷において大気境界層が小さくなりすぎるという問題を解消したスキームである。

b) Mellor-Yamada-Janjic schme

1982 年に Mellor と Yamada によって開発された Mellor-Yamada scheme¹⁰⁾ を 2002 年に Janjic が改良を加えたスキーム¹¹⁾ である。乱流運動エネルギー (turbulent kinetic energy ; TKE) の平方根と浮力の変数, 流れのせん断力によって, 大気境界層の上端を推定するスキームである。

c) MYNN 2.5 level PBL

2006 年に Nakanishi と Niino¹²⁾ が Mellor-Yamada scheme を改善したスキームである。

3) 積雲パラメタリゼーション¹³⁾

積雲パラメタリゼーションは, 大気境界層の上部でできる盛り上がった雲, もしくは, 積み重なった雲のことである積雲を表現するために用いられる。熱帯地方では, 大量の雨をもたらす, 大気を加熱するという働きをする。また, 積雲が生じた時には, 地上には影ができ, 日射を遮るという働きがある。積雲はモデル内で鉛直熱輸送と水蒸気鉛直分布から積雲発生条件を介して表現される。本研究で用いている **Kein-Fritsch scheme** は, 大気不安定度である CAPE から上昇気流か下降気流を判断し, その地点の水蒸気フラックスの収束量から積雲の強さを決めるというスキームである。

4) 大気放射スキーム

大気放射には, 長波放射と短波放射の 2 種類がある。長波放射とは, 絶対零度ではない温度を持つ物質が発している波長の長い電磁波 (赤外線) のことである。短波放射とは, 太陽から降り注ぐ太陽放射のことである。これらは, 大気や地表面を温める作用をしている。

a) rrtm longwave scheme

MM5 に導入されていた長波放射スキームであり, 1997 年に Mlawer¹⁴⁾ によって開発された。長波放射が水蒸気, オゾン, 二酸化炭素によって反射・散乱・吸収する様子を表現している。

b) rrtmg longwave scheme

2008 年に Iacono らによって開発されたスキーム¹⁵⁾ である。長波放射を 16 のスペクトルに分解し, 水蒸気, 二酸化炭素, オゾン, メタン, 亜酸化窒素, 酸素, 窒素, フロン類 (CFC-11, CFC-12, CFC-22) と四塩化炭素 CCL4 による吸収・散乱・反射を表現している。

c) Dudhia shortwave scheme

1989 年に Dudhia が MM5 のために開発したスキーム¹⁶⁾である。短波放射が水蒸気、二酸化炭素を含む空気中での散乱、水蒸気に吸収、そして、雲によって反射、吸収されるということを表限した最も単純なスキームである。

d) Goddard shortwave scheme

1994 年に Chou と Suarez によって開発されたスキーム¹⁷⁾である。短波放射を 11 のスペクトルに分割し、それぞれの反射・散乱・吸収を表現している。また、オゾンを考慮したスキームとなっている。

e) rrtmg shortwave scheme

2008 年に Iacono ら¹⁵⁾によって開発されたスキームである。短波放射を 14 のスペクトルに分解し、それぞれの反射・散乱・吸収を表現している。水蒸気、二酸化炭素、オゾン、メタン、亜酸化窒素、酸素、窒素、フロン類 (CFC-11, CFC-12, CFC-22) と四塩化炭素 CCL4 による反射・散乱・吸収を考慮している。

3.2.3 WRF モデルの解析に使用するデータ

(1) 解析雨量データ

豪雨の観測雨量には、気象庁の保有する気象レーダーと地域気象観測所 (アメダス) データを用いて解析された 1 時間降水量を収録した解析雨量データを使用した。

降水量の観測は、受水口直径が 20cm の雨量計で計測しており、雨量計の設置している場所での降水量は正確に測定されていると考えられる。しかし、降水は、気圧・気温といった気象要素に比べても局地性が強く、特に、対流性の降水の場合は約 17km² に 1 箇所の割合で配置されたアメダス雨量計でも十分に把握できないことがある。

解析雨量データは、国土交通省河川局・道路局と気象庁が全国に設置しているレーダーやアメダス等の地上の雨量計を組み合わせ、降水量分布を 1km 四方の細かさ (2001 年 4 月～2005 年 12 月までは 2.5km, 1988 年～2001 年 3 月までは 5km 四方) で解析したものである。そのため、雨量計の観測網にかからないような局所的な強雨も把握することができるという利点がある。

(2) NCEP-FNL データ

WRF に入力する気象データには、米国立環境予測センター (NCEP) の全球客観解析データ (FNL: Final Analysis) を使用した。このデータは、世界標準時で 1999 年 7 月 30 日 18 時～現在に掛けて 6 時間の時間解像度のデータが提供されている。水平解像度 1 度、地表面と 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, 10hPa) の全球データであり、気圧、海面更生気圧、ジオポテンシャル高度、気温、U、V 方向の風速、海面温度、土壌値 (アルベド、土壌温度、土壌水分/水分量等)、積雪量、相対湿度等が整理されている。

(3) 標高データ

WRFに入力する地形データには、アメリカ地質調査所 USGS (United States Geological Survey) で提供されている緯度経度、第 1 領域に 5 分、第 2 領域に 2 分の全地球数値標高モデルデータを使用し、第 3 領域に国土地理院の数値地図 50m メッシュ標高データを使用した。

3.2.4 NCEP-FNL データの精度検証

検討対象流域に初期条件・境界条件として NCEP-FNL データを用いるため精度について検証を行った。検証は、利根川流域内ではないが関東地方において高層気象観測結果が得られている館野地点の観測値と再解析値であるが利根川流域内の前橋地点におけるメソ客観解析データと相対湿度，風速，および気温について比較を行った。

館野高層気象観測所と近傍の NCEP-FNL 等の位置図を図 3.4 に、前橋地上観測所と近傍の NCEP-FNL 等の位置図を図 3.5 に示す。



図 3.4 館野高層気象観測所と近傍の NCEP-FNL 等格子点位置図



図 3.5 前橋地上観測所と近傍の NCEP-FNL 等格子点位置図

(1) 館野地点での高層気象観測との比較

検討対象 6 豪雨のそれぞれの各豪雨ピーク時における鉛直分布を館野高層気象観測値と比較した。

1) 相対湿度

相対湿度の NCEP-FNL データと館野地点における高層気象観測値との比較を図 3.6 に示す。豪雨 2,3,4,および 6 については、地上から 700hPa の範囲の相対湿度は高層気象観測値と±5%の誤差で一致している。これに対して、豪雨 5（前線性）では高層気象観測値に対して NCEP-FNL のデータは最大 30%程度大きめになっている。また、豪雨 1（台風性）で NCEP-FNL のデータが最大 18%程度大きめになっている。

2) 風速

風速の NCEP-FNL データと館野地点における高層気象観測値との比較を図 3.7 に示す。豪雨 1, 3, 5 および 6 では風速の鉛直分布が最大 30%以内の誤差で再現されているが、豪雨 2, 4 では地上から 500hPa の範囲で約 50%程度観測値に対して大きくなっている。

3) 気温

気温の NCEP-FNL データと館野地点における高層気象観測値との比較を図 3.8 に示す。豪雨 1,2,3,および 6 は最大 2℃の違いであり再現性が高い。一方、豪雨 4 については最大 4℃、豪雨 5 については最大 6℃の違いが見られる。

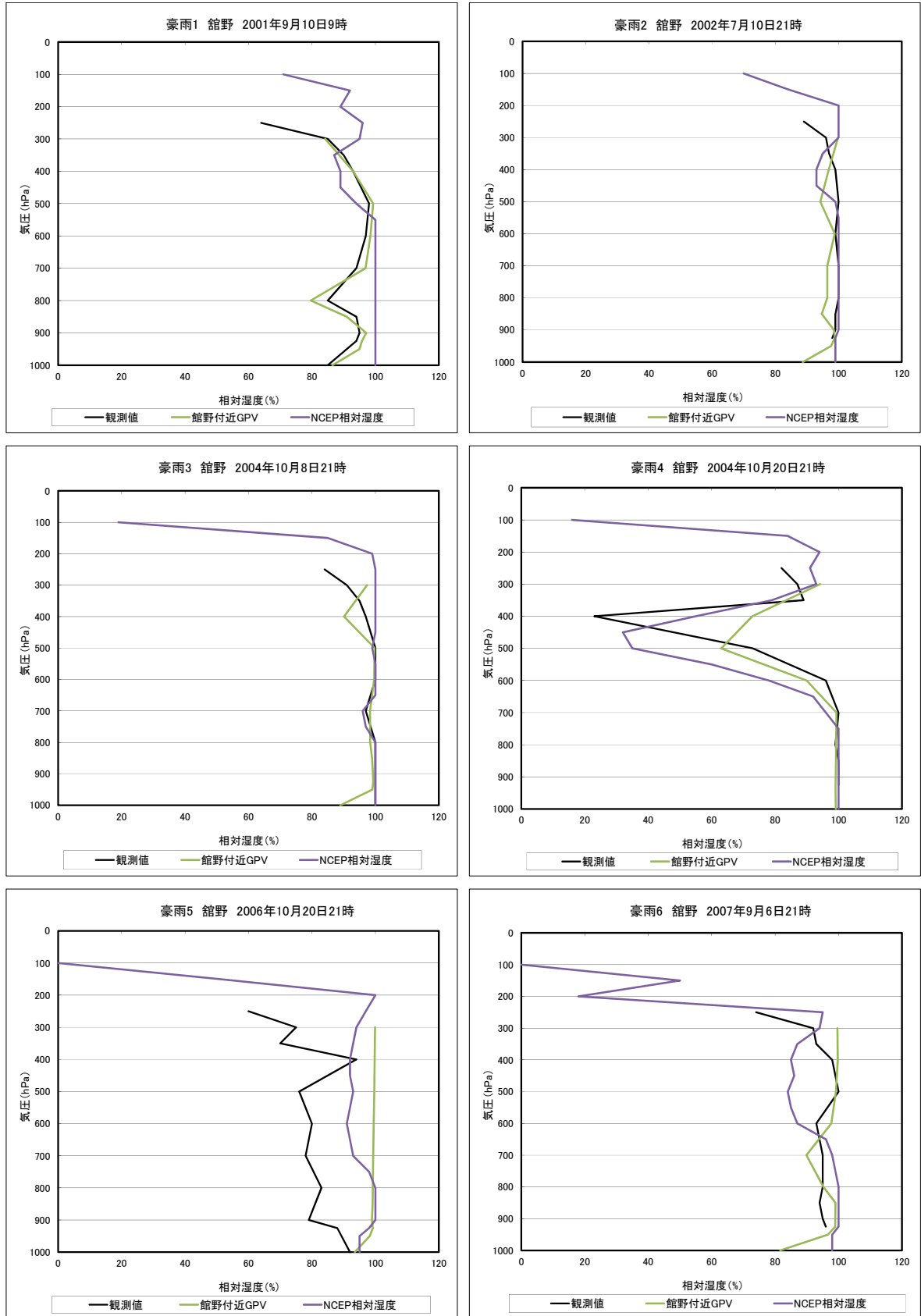


図 3.6 館野地点における相対湿度の鉛直分布の比較

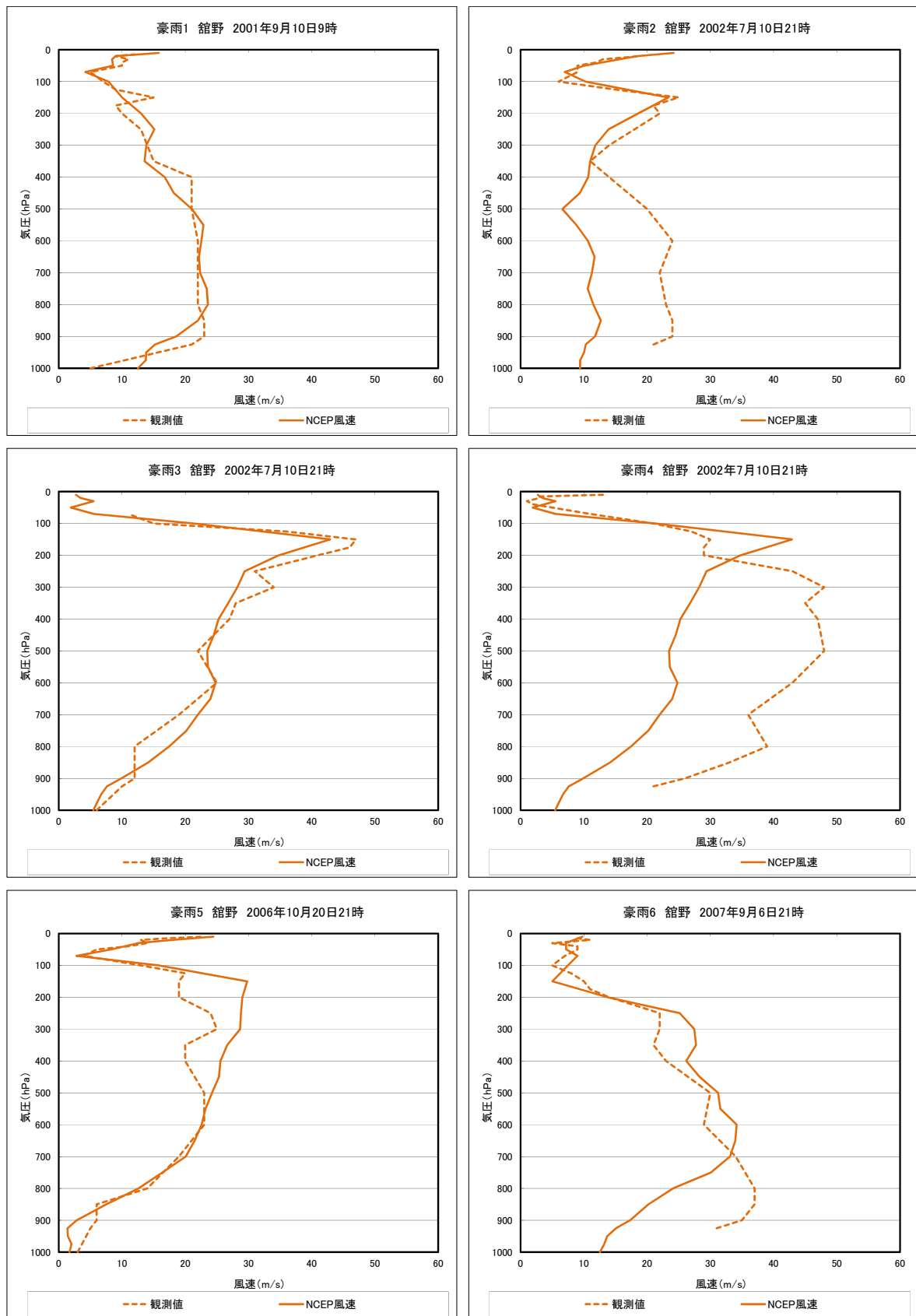


図 3.7 館野地点における風速の鉛直分布の比較

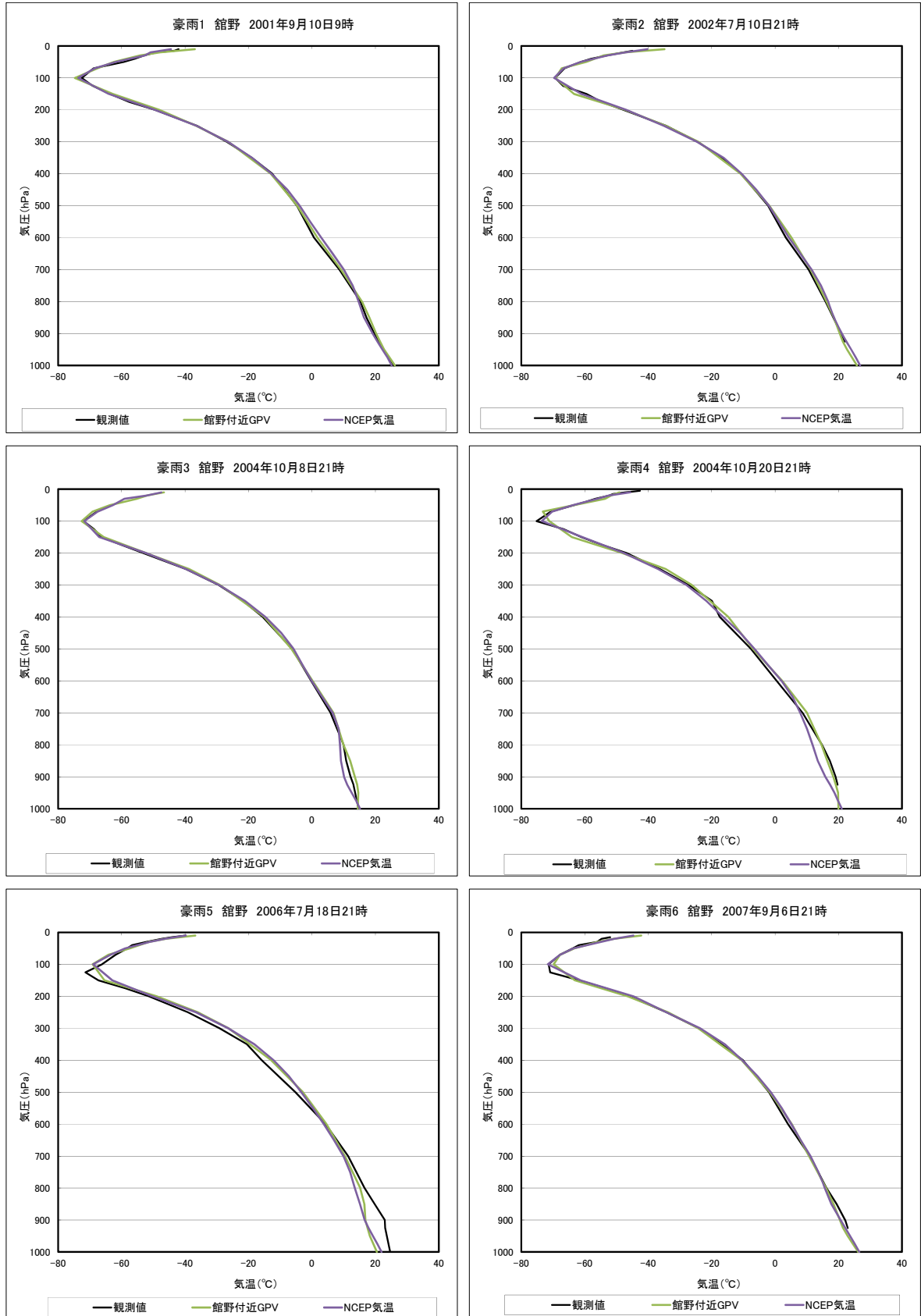


図 3.8 館野地点における気温の鉛直分布の比較

(2) 前橋地点におけるメソ客観解析データとの比較

1) 相対湿度

前橋地点における NCEP とメソ客観解析データの鉛直分布の比較を図 3.9 に示す。豪雨 3 は 800hPa における値を除いて 5%以内の誤差ではほぼ一致しているが、その他の豪雨では NCEP の相対湿度はメソ客観解析データより 30～40%程度小さくなっている。前橋地点における同時刻の地上観測値と比較した結果を表 3.1 に示す。豪雨 1 以外はメソ客観解析データが 6%以内の違いとなっている。これに対して NCEP のデータは豪雨 1 では地上観測値と一致しているが豪雨 2～豪雨 5 は平均的に約 10%の誤差となっている。

表 3.1 前橋地点における相対湿度の比較のまとめ

豪雨	①前橋地上 観測	②NCEP-FNL		③メソ客観解析	
	相対湿度 (%)	相対湿度 (%)	①との差分 (%)	相対湿度 (%)	①との差分 (%)
1	83	83	0	90	7
2	91	79	-12	94	3
3	91	85	-6	89	-2
4	92	69	-23	98	6
5	91	80	-11	90	-1
6	83	79	-4	81	-2

2) 風速

NCEP-FNL とメソ客観解析データの鉛直分布の比較を図 3.10 に示す。風速に関しては、豪雨 5 のように上層と下層で傾向が逆転している場合や 2 倍以上異なる値となっている。

3) 気温

NCEP-FNL とメソ客観解析データの鉛直分布の比較を図 3.11 に示す。気温に関しては豪雨 1 と豪雨 6 は 2℃以内の違いであるがその他の 4 豪雨については NCEP データとメソ客観解析データはの違いは 5℃程度となっている。

(3) NCEP-FNL データ精度検証のまとめ

気温に関しては館野地点および前橋地点において観測値との差が見られず再現性が高い。また、相対湿度は館野地点においては大きな誤差はなく、前橋地点においても地上観測値との誤差は 10%程度である。さらに、風速に関しては観測値に対して小さめに再現されている豪雨もあるが 6 号豪雨中 4 豪雨は再現性が高い。したがって降雨に影響を及ぼす気温、相対湿度、および風速の館野地点高層気象観測値の再現性は確保されており検討に用いるデータとして十分な精度を有している。

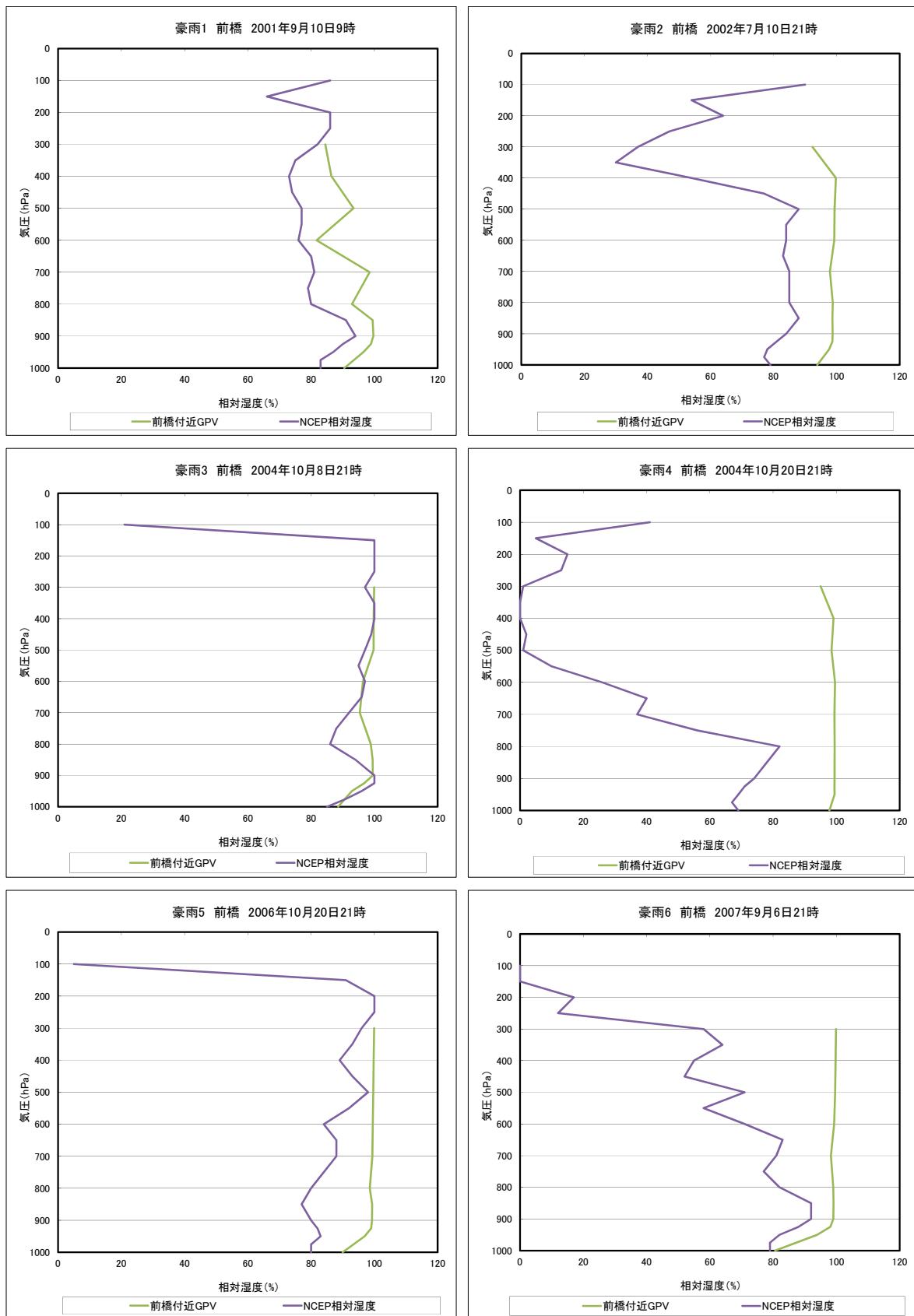


図 3.9 前橋地点における相対湿度の鉛直分布の比較

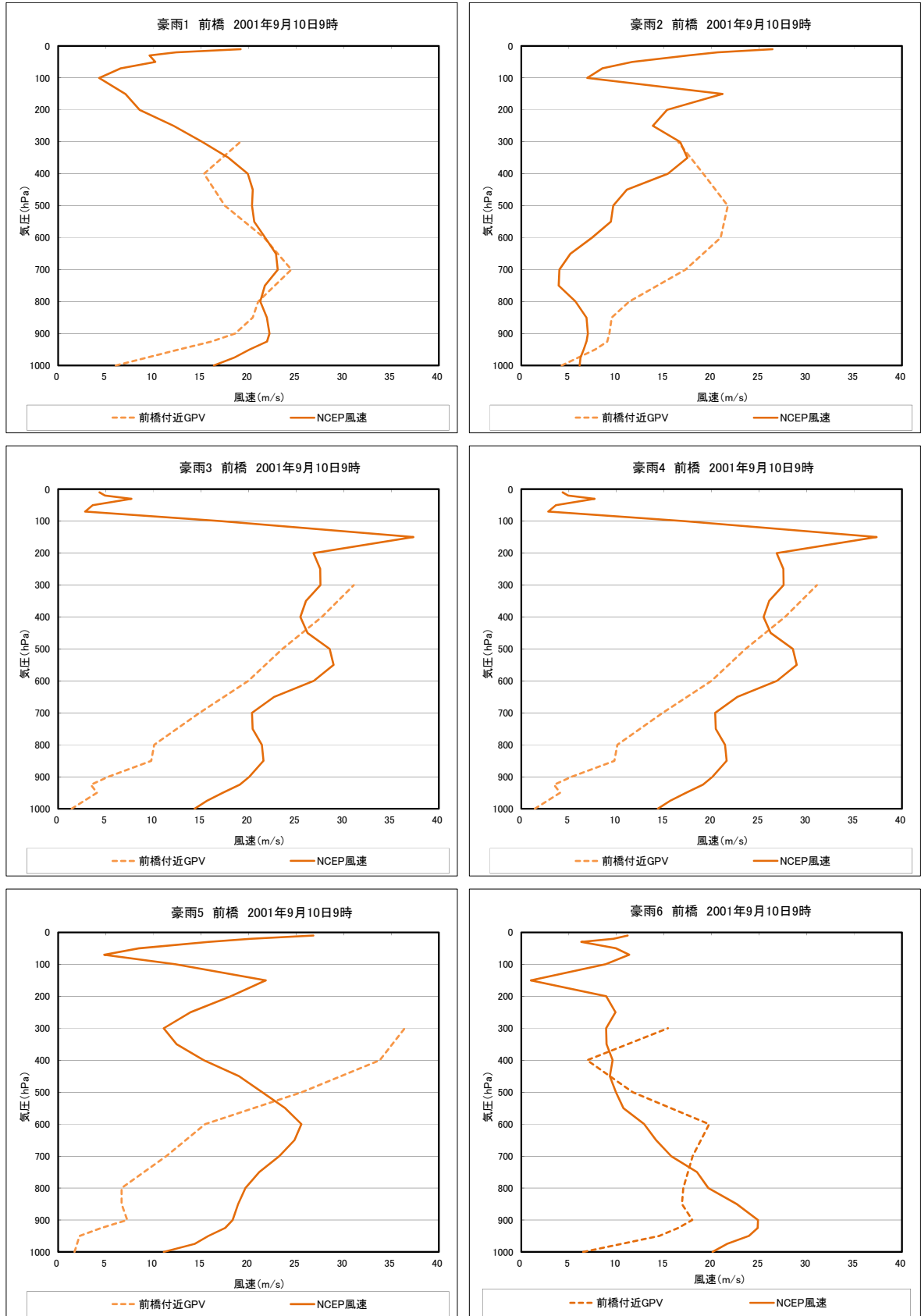


図 3.10 前橋地点における風速の鉛直分布の比較

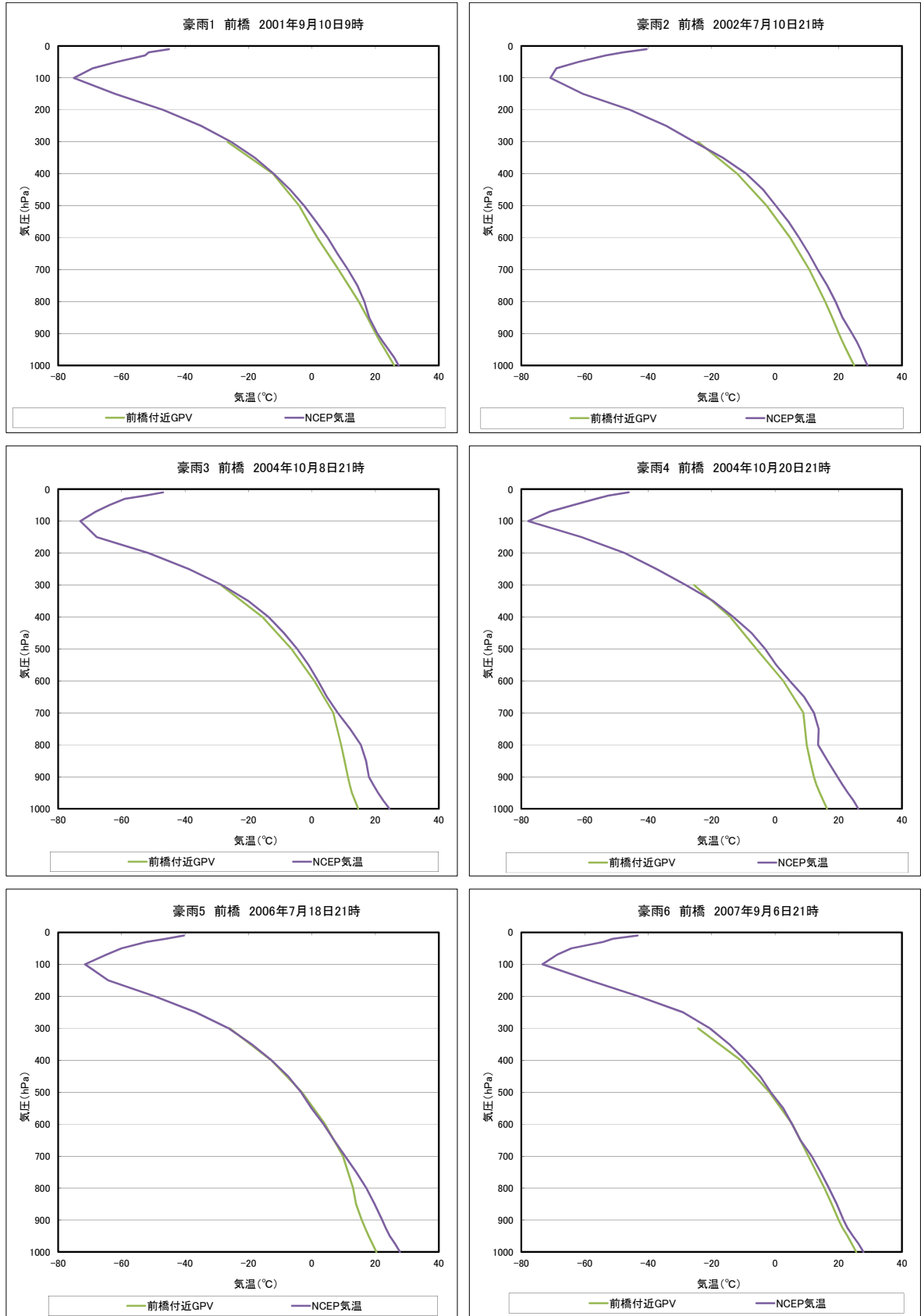


図 3.11 前橋地点における気温の鉛直分布の比較

3.2.5 WRF を使用した豪雨の再現方法

豪雨の再現を行う方法について述べる．まず，対象領域は図 3.12 に示したように，日本周辺の第 1 領域（16km メッシュ），第 2 領域（4km メッシュ），利根川流域を含む第 3 領域（1km メッシュ）とした．領域の選択には，米国海洋大気庁（NOAA）が配布している WRF Domain Wizard を用いて設定した．グラフィカルユーザーインターフェースによる視覚的な対象領域の設定が可能であり，さらに，WRF の前処理ソフトである WPS のプログラムの実行，WRF の条件設定ファイルの作成も自動で行うことができる．利根川流域における最適な物理パラメタリゼーションを選択するため，表 3.2 に示すように，雲微物理，積雲対流，大気境界層，長波放射，短波放射等の物理パラメタリゼーションを変化させた 4 ケースの再現を行う．case1 が WRF Domain Wizard の初期設定のままの設定，case2 が雲微物理スキームに考慮する降水粒子の最も多い Morrison モデルを用いる設定，case3 が仲野らが関東地方の豪雨の再現計算に用いた設定¹⁸⁾，case4 が WRF-ARW ユーザーズガイドにハリケーンを再現する際に使用する例として挙げられている設定を用いた．

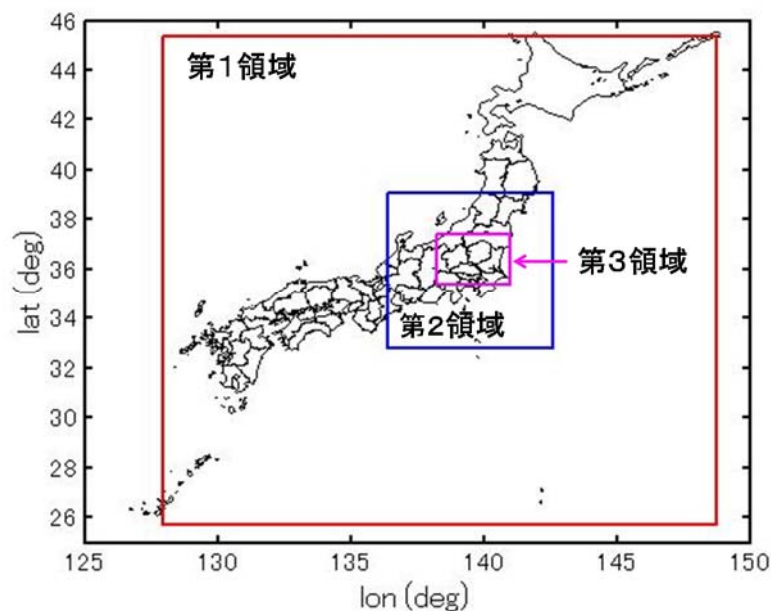


図 3.12 WRF 計算領域図

表 3.2 物理パラメタリゼーション変更ケース

計算ケース	雲微物理スキーム	境界層スキーム
case1	WSM 3-class simple ice scheme	YSU scheme
case2	Morrison 2-moment scheme	Mellor-Yamada-Janjić scheme
case3	Thompson graupel scheme	MYNN 2.5 level PBL
case4	WSM 6-class graupel scheme	YSU scheme

計算ケース	積雲対流パラメタリゼーション	長波放射スキーム	短波放射スキーム
case1	Kain-Fritsch scheme	rrtm scheme	Dudhia scheme
case2			Goddard shortwave scheme
case3			
case4		rrtmg scheme	rrtmg scheme

3.3 実績豪雨の再現性

3.3.1 再現計算結果からの物理的パラメタリゼーションの選定

(1) パラメタリゼーションの検討対象降雨

case1～case4 の計算条件を用いて、台風性豪雨および前線性豪雨に対する再現性の比較を行い最も再現性の高い物理パラメタリゼーションの選定を行う。選定された物理パラメタリゼーションを用いて検討対象 6 豪雨の再現性を検討する。物理パラメタリゼーションの比較検討のための豪雨は、台風性豪雨は 72 時間雨量がもっとも大きい豪雨 6，および前線性豪雨については 72 時間雨量が 2 番目に大きい豪雨 5 を対象とした。なお、再現期間は各豪雨の利根川流域平均降水量が最大となる 72 時間を含む 4 日間を対象とし、助走期間を 3 日として計算を行った。利根川流域平均降雨量が最大となる 72 時間は、日本時間で、豪雨 5 が 2006 年 7 月 16 日 13 時～2006 年 7 月 19 日 12 時、豪雨 6 が 2007 年 9 月 4 日 20 時～2007 年 9 月 7 日 19 時までであり、この期間を対象に再現を行う。

(2) 豪雨 5(前線性豪雨)

解析雨量と WRF で再現した各ケースの第 3 領域の八斗島上流域平均雨量の時系列分布を図 3.13 に示した。また、それぞれの八斗島上流域平均 72 時間雨量について表 3.3 に示した。さらに第 3 領域の 72 時間降水量の平面分布を図 3.14 に示した。

図 3.13 の時系列分布をみると一山目のピーク時刻は、解析雨量が 7 月 17 日 10 時、case1 が 17 日 7 時、case2 が 17 日 9 時、case3 が 17 日 10 時、case4 が 17 日 8 時とどのケースでも解析雨量と比べ 1～3 時間のずれが生じているがおおむね一致していることが分かる。一山目以降では、解析雨量が 19 日 4 時、case1 が 19 日 7 時、case2 が 19 日 4 時、case3 が 18 日 17 時、case4 が 19 日 4 時と case3 を除けば、最大 4 時間のずれが生じていた。一方、解析の対象とした時間の前半部分（17 日 13 時ごろまで）については降水強度もピーク時に解析雨量で 7.4mm/hr、case1 が 6.2mm/hr、case2 が 9.0mm/hr、case3 が 9.1mm/hr、case4 が 5.7mm/hr とおお

むね一致し、良い再現結果が得られている。一方、後半部分では、再現計算による降水量が解析雨量よりも小さい値となっている。そのため、表 3.3 を見ると八斗島上流域平均 72 時間降水量が解析雨量の結果 225.9mm と比べ、最も再現性が高いのは case1 の 188.3mm であり、約 40mm 以上の差が生じていた。一方、降水域は図 3.14 の WRF で計算した第 3 領域では、case1 の西端での強い降水が生じている以外に解析雨量と再現ケースで同じような分布は見られず、再現性の判断が難しい。そのため、より詳しく降水分布を見るために第 2 領域の 72 時間降水量の平面分布を図 3.15 に示した。この図に赤丸で示した範囲で強い降水が生じている場所は解析雨量と比較しても case1, case4 は類似した分布となっている。また、赤丸で示した範囲の 72 時間降水量の最大値は、解析雨量 830.6mm, case1 が 716.0mm, case4 が 617.6mm であり、case1 が最も解析雨量と近い値をとることが分かった。以上のことから、case1 では時系列分布を見れば、前半部分で再現性があり、平面分布も強い降雨が生じている場所の再現はできていると考えられる。

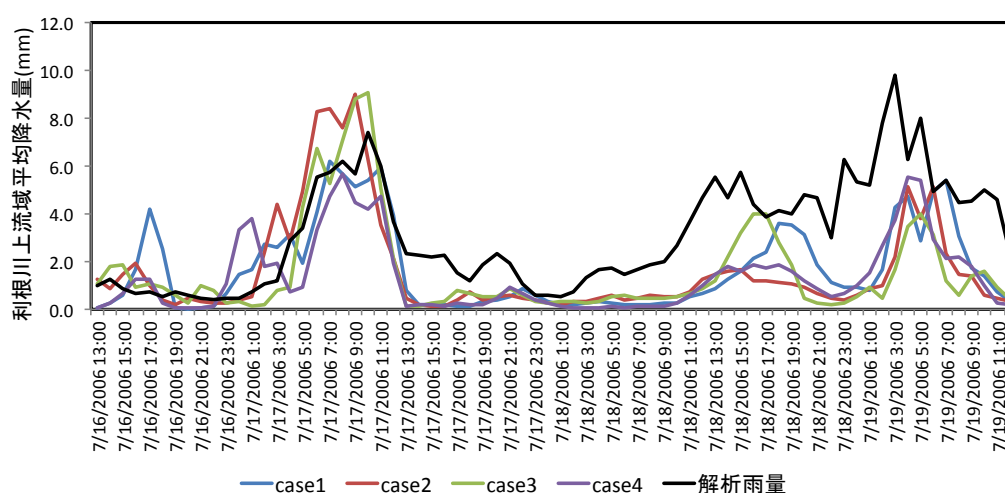


図 3.13 豪雨 5 の再現計算ケースごとの八斗島上流域平均時間降雨量の時系列分布

表 3.3 豪雨 5 の八斗島上流域平均 72 時間降雨量の再現結果

計算ケース	利根川上流域平均 72 時間降雨量 (mm)
解析雨量	225.9
case1	188.3
case2	22.5
case3	157.2
case4	86.0

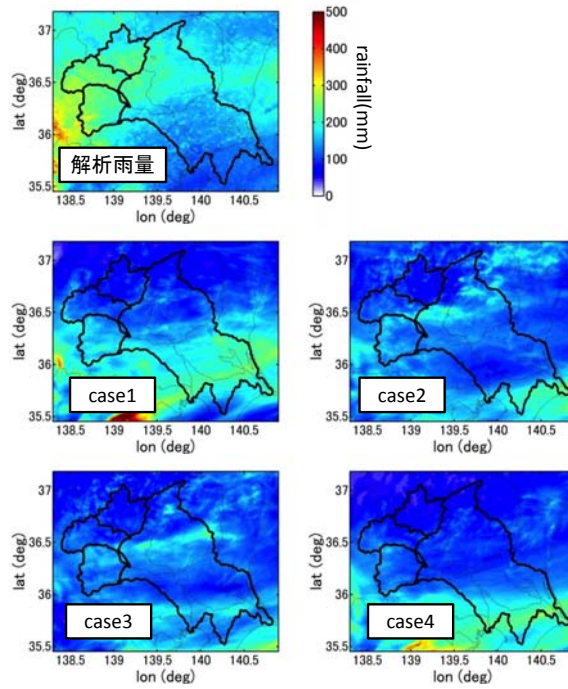


図 3.14 豪雨 5 の再現計算ケースごとの 72 時間降雨量の平面分布（第 3 領域）

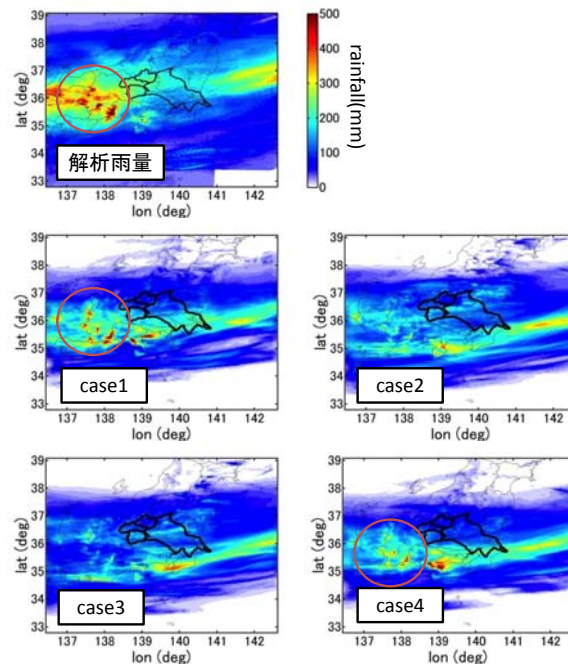


図 3.15 豪雨 5 の再現計算ケースごとの 72 時間降雨量の平面分布（第 2 領域）

(3) 豪雨 6 (台風性豪雨)

豪雨 5 と同様にして整理した結果を図 3.16、表 3.4、図 3.17 に示した。図 3.16 の時系列分布をみると降雨のピーク時間は、解析雨量で 9 月 6 日 23 時、case1 が 6 日 20 時、case2、3、4 は 6 日 17 時となっており、解析雨量と比べ最も近い case1 で 3 時間早くピークを迎えて

いる。一方、表 3.4 を見ると、八斗島上流流域平均 72 時間降雨量が解析雨量の結果 258.4mm に対し、再現計算の 4 ケースで最も大きいのは case1 で 175.6mm であり、解析雨量の結果と比べ約 80mm 小さくなった。続いて、図 3.17 を見ると 72 時間降水量の平面分布は、図中に赤丸で示した箇所で降水が発生し、どの再現ケースでも解析雨量の結果とほぼ同じ分布が得られている。

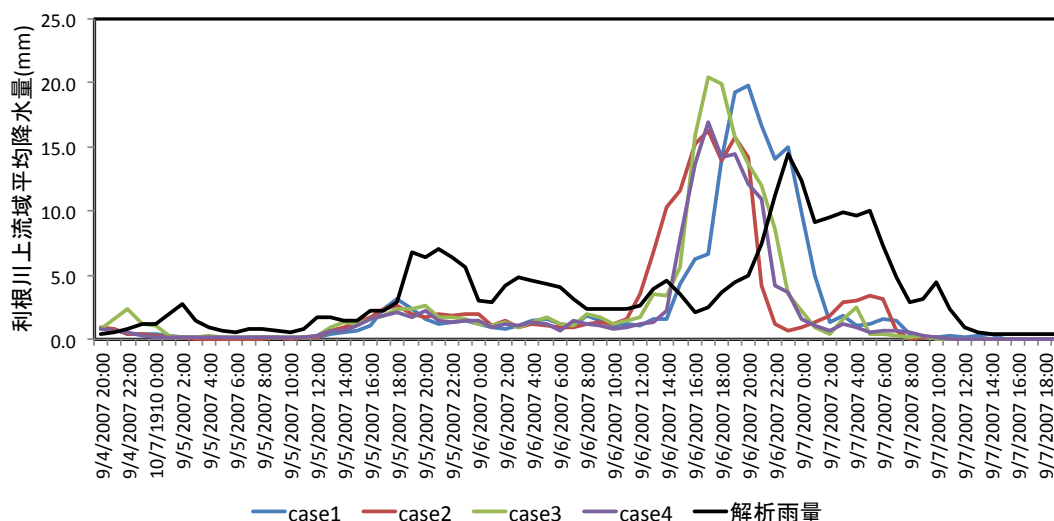


図 3.16 豪雨 6 の再現計算ケースごとの八斗島上流流域平均時間降雨量の時系列分布

表 3.4 豪雨 6 の八斗島上流流域平均 72 時間降雨量の再現結果

計算ケース	八斗島上流流域平均 72 時間降雨量 (mm)
解析雨量	258.4
case1	175.6
case2	107.1
case3	156.5
case4	301.6

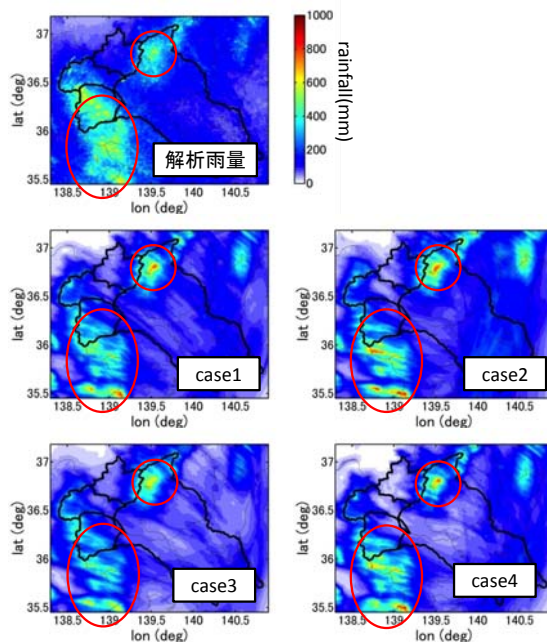


図 3.17 豪雨 6 の再現計算ケースごとの 72 時間降雨量の平面分布（第 3 領域）

(4) 再現計算に用いる物理パラメタリゼーション

豪雨 5、および豪雨 6 の再現計算結果から、豪雨 5 では再現計算した 4 ケースの中で case1 の利根川上流域平均 72 時間降雨量が解析雨量値に近く、また、第 2 領域を見れば平面分布も再現されていることから、最も再現性があると判断した。次に、豪雨 6 では再現計算した 4 ケースの中で、case1 の利根川上流域平均降水量のピーク時間が解析雨量に近く、利根川上流域平均 72 時間降水量も解析雨量値に近い。さらに、平面分布も再現されていたことから、case1 が最も再現性があると判断した。したがって、物理パラメタリゼーションの設定は、豪雨 5、豪雨 6 共に最も降雨分布の再現性が良い case1 を用いて再現計算を行う。

3.3.2 6 豪雨を対象とした再現性

前項で設定した物理的パラメタリゼーションを用いて、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解析雨量との比較を行った。その結果、表 3.5 に示すように、解析雨量の 72 時間雨量に対する再現性は 68% から 168% 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 70% 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 2 時間遅れていた。

表 3.5 検討対象豪雨に対する再現結果のまとめ

豪雨	72時間雨量(mm)			ピーク雨量(mm/hr)			ピーク発生時刻
	実績	再現計算	再現／実績	実績	再現計算	再現／実績	実績に対する再現計算の発生時刻
1	175.2	247.9	1.41	11.6	18.9	1.63	2時間早い
2	159.2	237.2	1.49	10.9	15.4	1.41	13時間早い
3	98.4	121.9	1.24	7.1	6.2	0.87	2時間遅い
4	107.6	181.1	1.68	10.8	13.3	1.23	2時間早い
5	225.8	188.3	0.83	9.9	10.6	1.07	1時間早い
6	257.8	176.4	0.68	14.3	19.6	1.37	2時間遅い

(1) 豪雨 1

豪雨 1 (台風性)の解析雨量との時間分布の比較を図 3.18(1)に示す。最大 72 時間流域平均雨量に関しては、解析雨量が 175.2mm に対して計算値が 247.9mm となっている。ピーク雨量は解析雨量が 11.9mm に対し計算値が 18.9mm と計算値のほうが大きく、ピーク発生時刻は計算値が実績に対して 2 時間早くなっている。また、72 時間雨量の平面分布は図 3.19 に示すように八斗島流域東側および南側の強雨域が再現されている。

(2) 豪雨 2

豪雨 2 (前線を伴う台風性)の解析雨量との時間分布の比較を図 3.18(1)に示す。最大 72 時間流域平均雨量に関しては、解析雨量が 159.2mm に対して計算値が 237.2mm となっている。ピーク雨量は解析雨量が 10.8mm に対し計算値が 15.5mm と計算値のほうが大きく、第 1 ピーク発生時刻は計算値が実績に対して 2 時間早くなっている。第 2 ピークに関しては 2 時間早くなっており計算値に対してピーク発生時刻が早めになっている。また、72 時間雨量の平面分布は図 3.20 に示すように八斗島流域東側の強雨域の傾向は再現されているが、八斗島流域南側には解析雨量に見られる強雨は発生していない。

(3) 豪雨 3

豪雨 3 (前線を伴う台風性)の解析雨量との時間分布の比較を図 3.18(1)に示す。最大 72 時間流域平均雨量に関しては、解析雨量が 98.4mm に対して計算値が 121.2mm となっている。ピーク雨量は解析雨量が 7.1mm に対し計算値が 5.0mm と計算値のほうが小さくなっている。ピーク発生時刻に関しては 2 時間遅くなっており計算値に対してピーク発生時刻が早めになっている。さらに、解析雨量は第 1 ピーク後雨量が低下し再度大きくなるのに対して計算値では 5mm/hr 程度の雨量が 10 時間程度継続している。また、72 時間雨量の平面分布は図 3.21 に示すように八斗島流域西側の強雨域の発生傾向が再現されている。

(4) 豪雨 4

豪雨 4 (前線を伴う台風性)の解析雨量との時間分布の比較を図 3.18(2)に示す。最大 72 時間流域平均雨量に関しては、解析雨量が 107.8mm に対して計算値はピーク前の雨量が計算値に対して大きい傾向であり 181.1mm と実績値に対して大きくなっている。ピーク雨量は解析雨

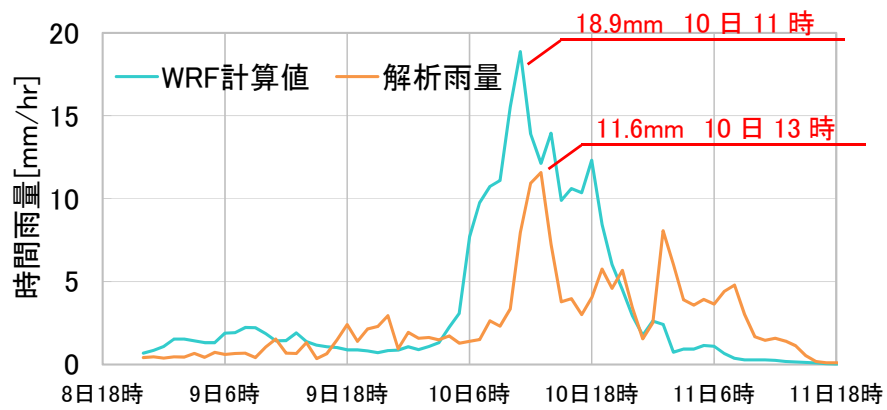
量が 10.8mm に対し計算値が 13.3mm と計算値のほうが大きくなっている。また、ピーク発生時刻に関しては 2 時間早くなっている。また、72 時間雨量の平面分布は図 3.22 に示すように八斗島流域東側および西側の強雨域の発生傾向は表現されているが八斗島流域全体的に実績値より大きくなっており 72 時間雨量が解析雨量に対して大きくなっている。

(5) 豪雨 5

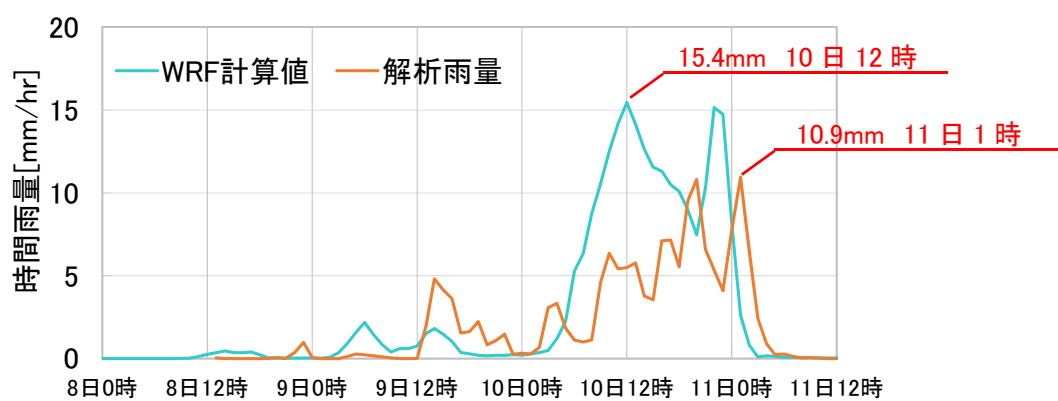
検討対象 6 豪雨のなかで最も再現性の高い豪雨 5(前線性)の解析雨量との時間分布の比較を図 3.18(2)に示す。降雨分布の第 1 ピークは解析雨量が 10.6mm に対し計算値が 9.9mm, 第 2 ピークでは解析雨量が 9.2mm に対して計算値が 7.5mm となっている。最大 72 時間流域平均雨量に関しては、解析雨量が 225.8mm に対して計算値が 188.3mm となっている。また、72 時間雨量の平面分布は図 3.23 に示すように解析雨量の分布と計算結果は概ね一致している。

(6) 豪雨 6

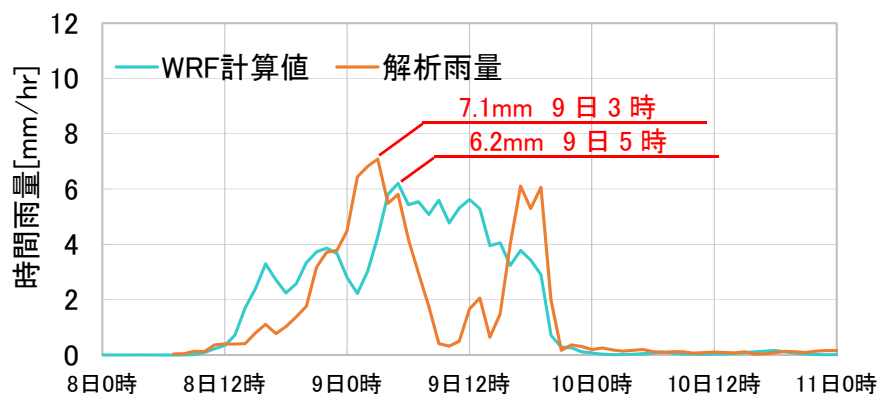
豪雨 6 (台風性)の解析雨量との時間分布の比較を図 3.18(2)に示す。最大 72 時間流域平均雨量に関しては、解析雨量が 257.8mm に対して計算値が 176.4mm となっている。ピーク雨量は解析雨量が 14.4mm に対し計算値が 18.9mm と計算値のほうが大きく、ピーク発生時刻は計算値が実績に対して 4 時間早くなっている。また、72 時間雨量の平面分布は図 3.24 に示すように八斗島流域東側および南側の強雨域が再現されている。



(a) 豪雨 1



(b) 豪雨 2



(c) 豪雨 3

図 3.18(1) 72 時間解析雨量と再現計算結果の時間分布の比較 (豪雨 1, 2, 3)

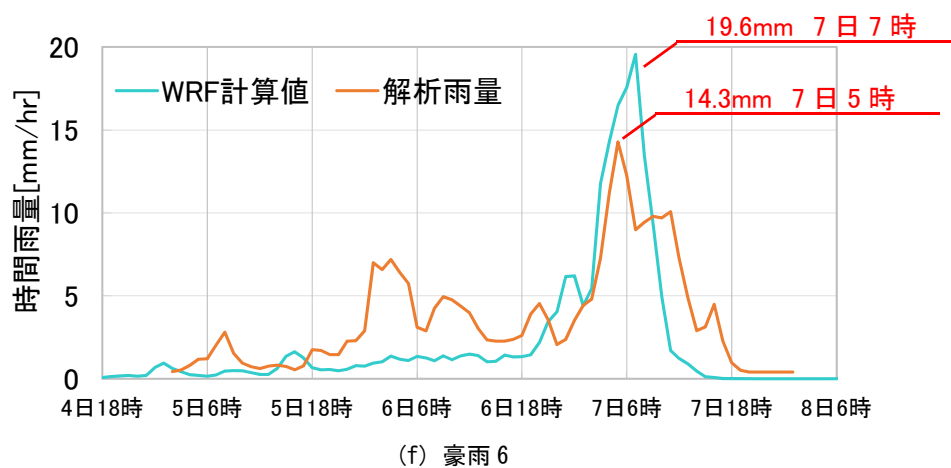
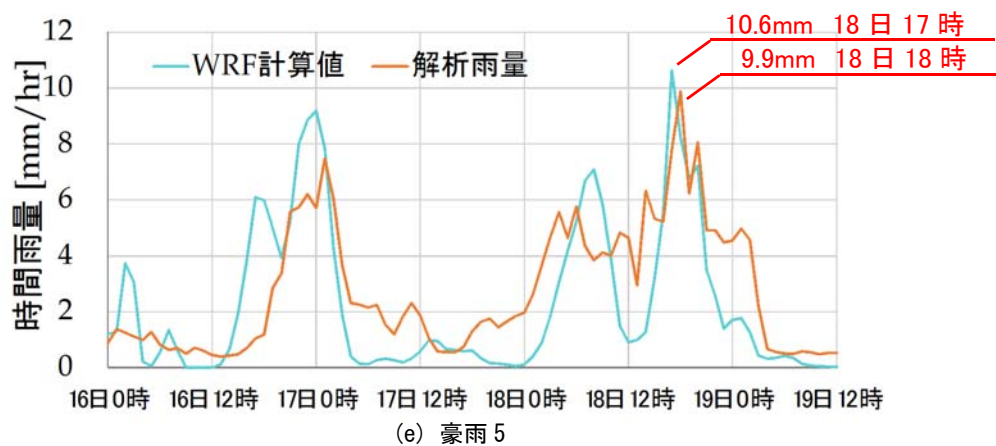
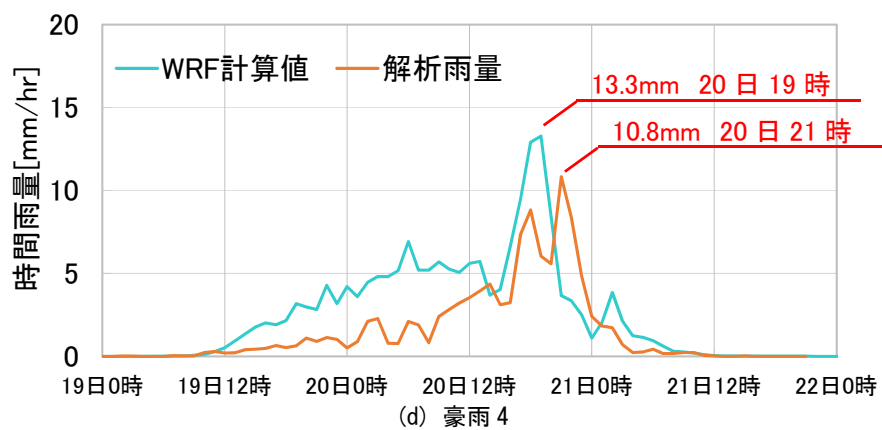
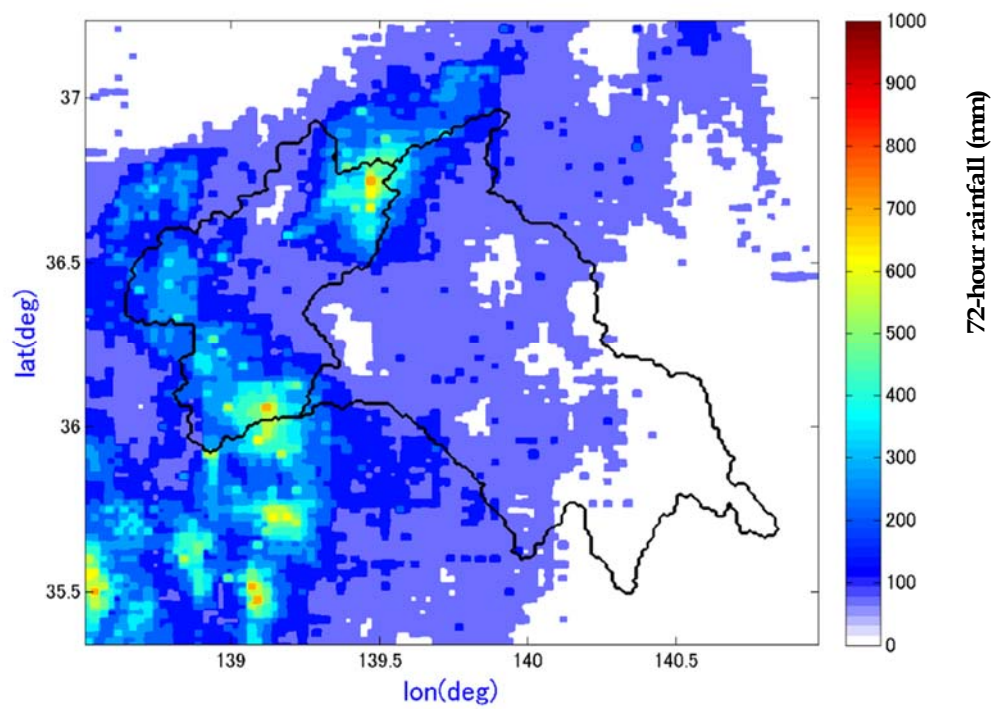
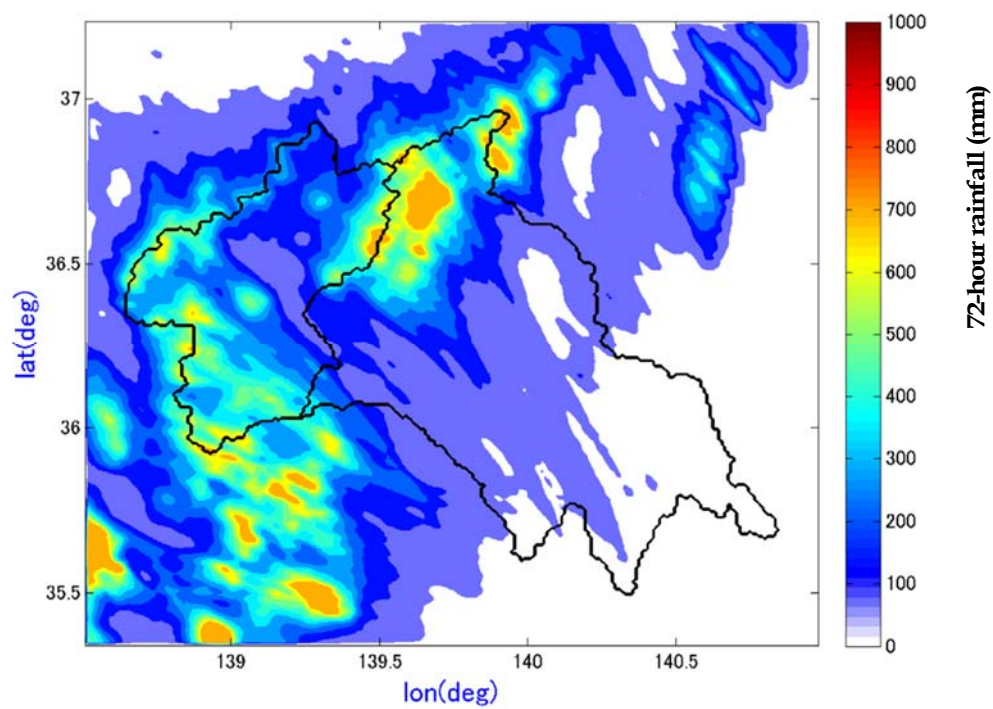


図 3.18(2) 72 時間解析雨量と再現計算結果の時間分布の比較(豪雨 4, 5, 6)

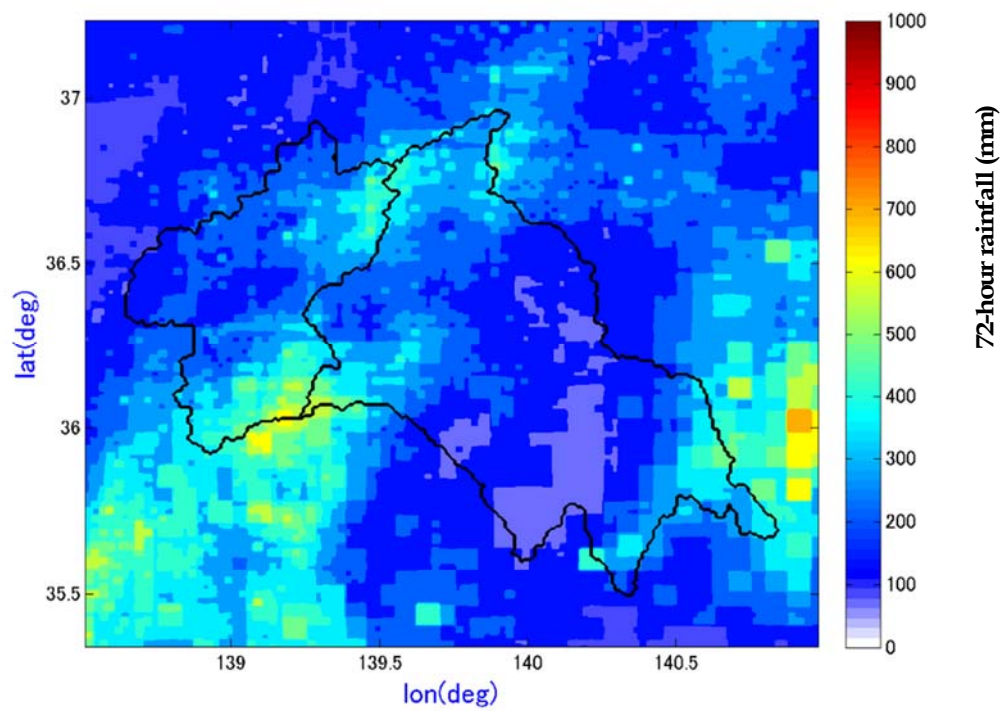


(a) 解析雨量の平面分布

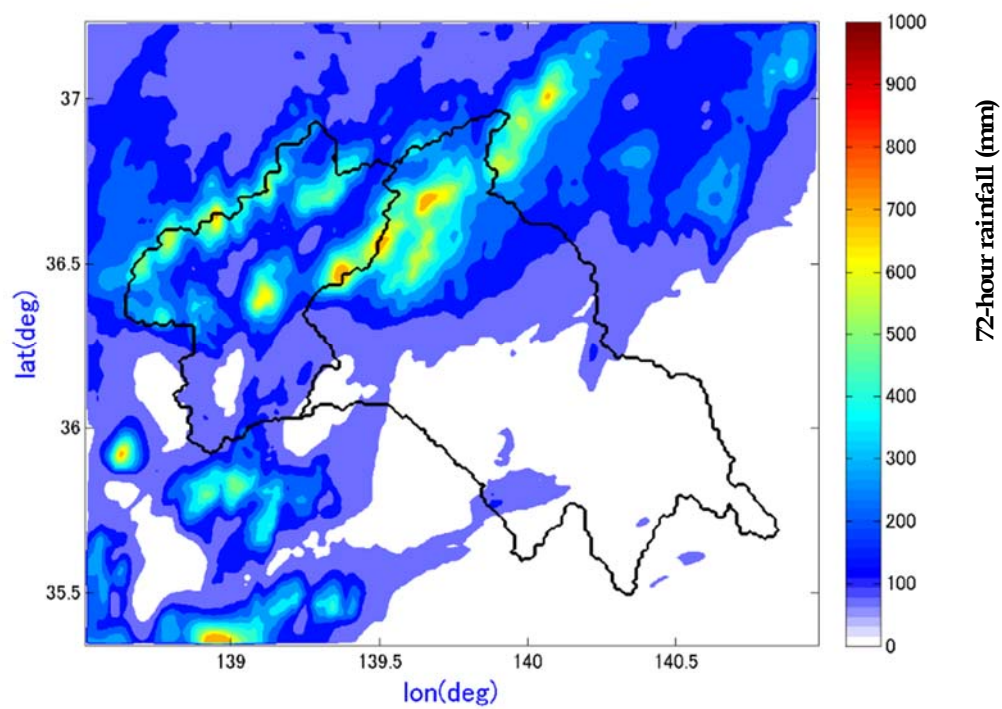


(b) 再現計算雨量の平面分布

図 3.19 72 時間解析雨量と再現計算結果の平面分布の比較 (豪雨 1 2001.09.10)

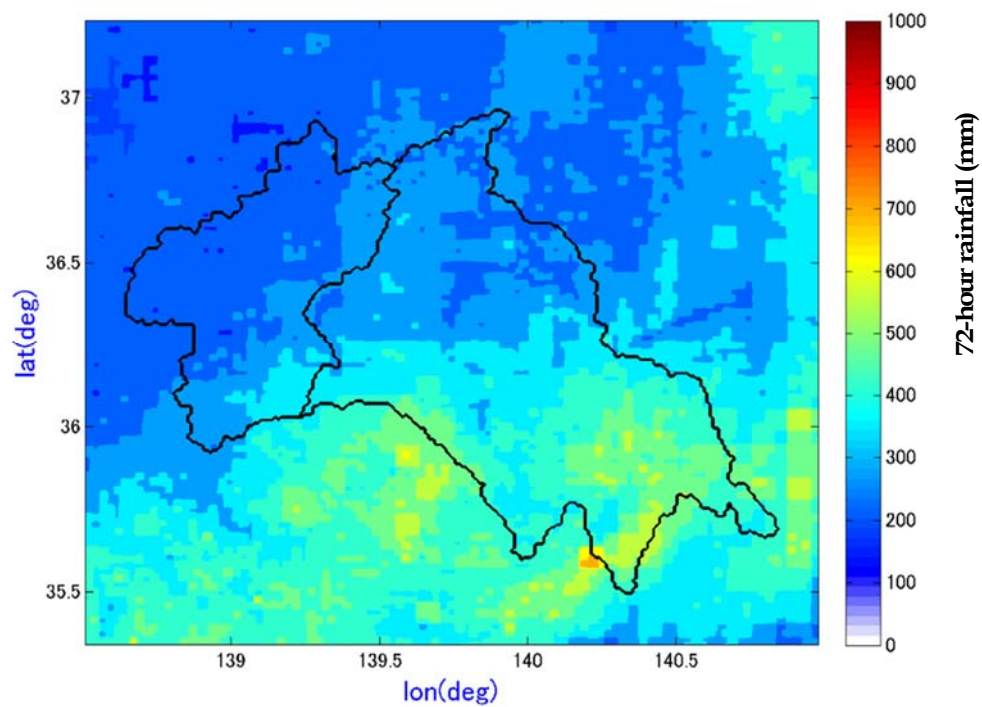


(a) 解析雨量の平面分布

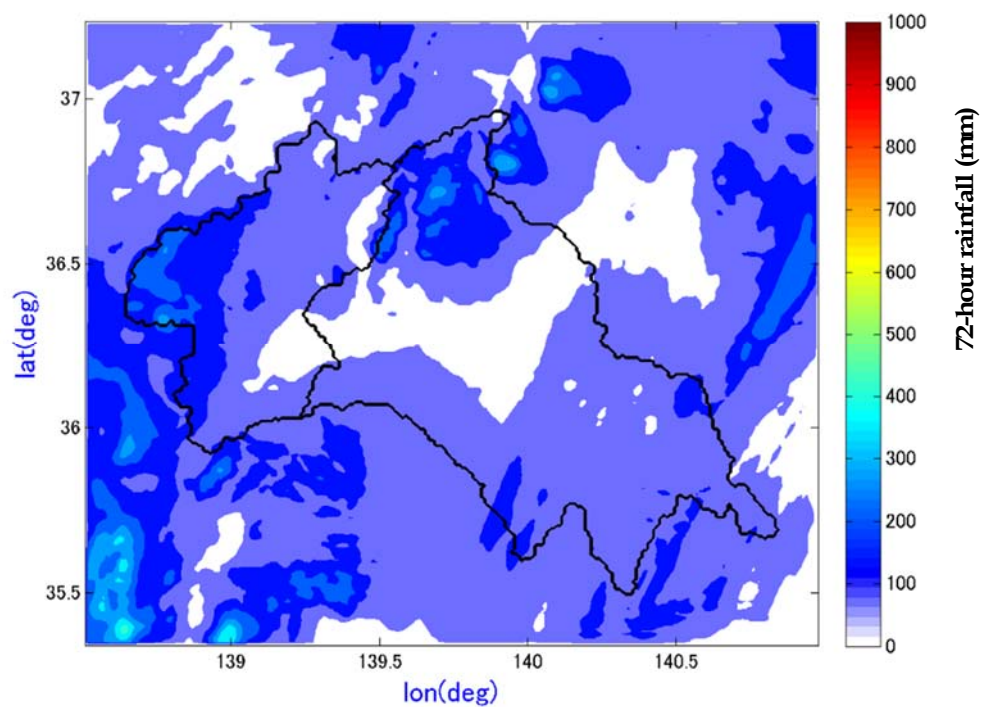


(b) 再現計算雨量の平面分布

図 3.20 72 時間解析雨量と再現計算結果の平面分布の比較(豪雨 2 2002. 07. 11)

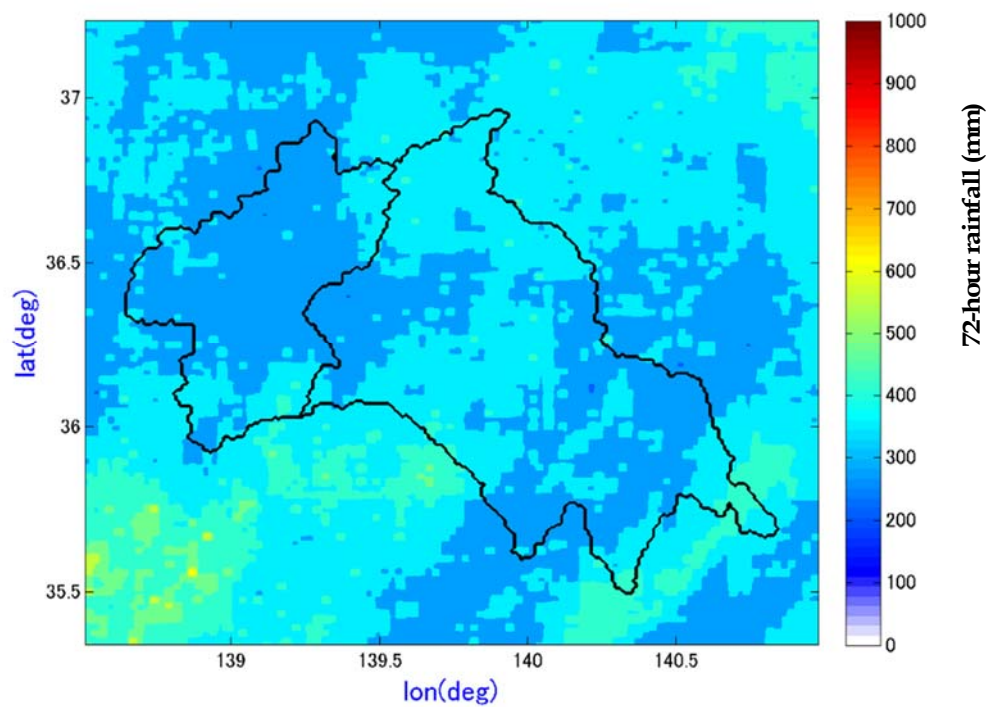


(a) 解析雨量の平面分布

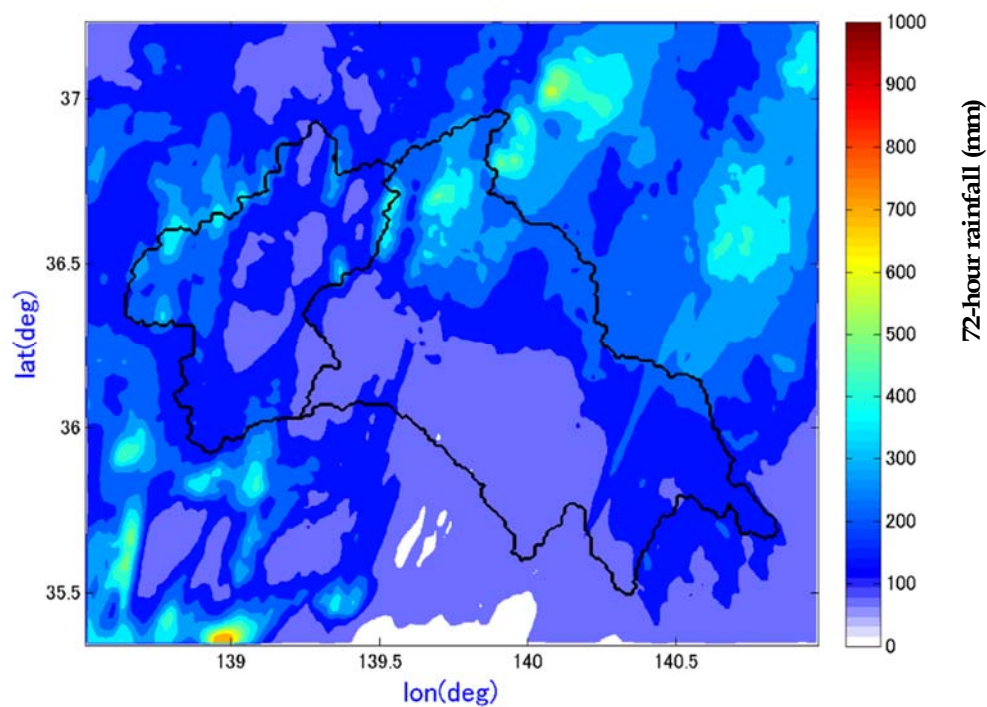


(b) 再現計算雨量の平面分布

図 3.21 72 時間解析雨量と再現計算結果の平面分布の比較(豪雨 3 2004. 10. 09)

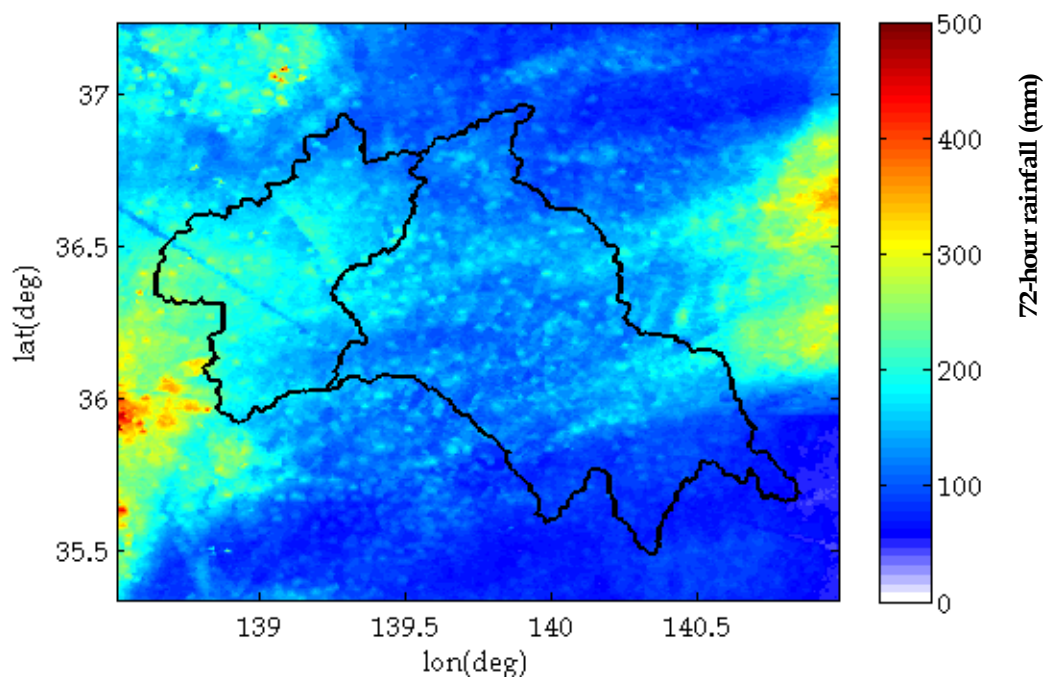


(a) 解析雨量の平面分布

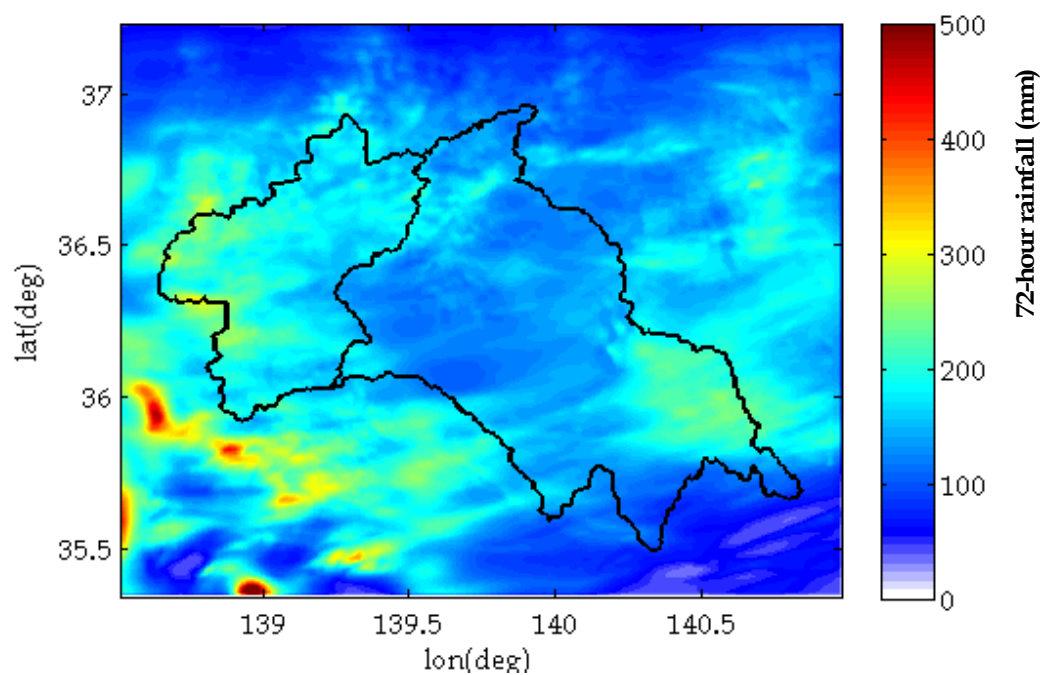


(b) 再現計算雨量の平面分布

図 3.22 72 時間解析雨量と再現計算結果の平面分布の比較(豪雨 4 2004. 10. 21)

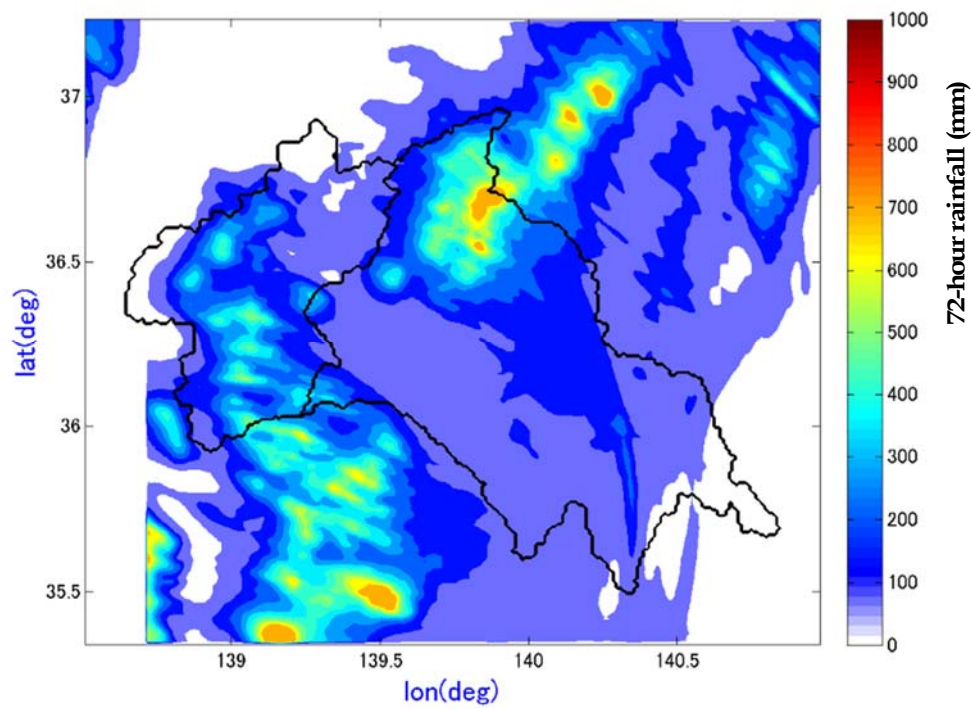


(a) 解析雨量の平面分布

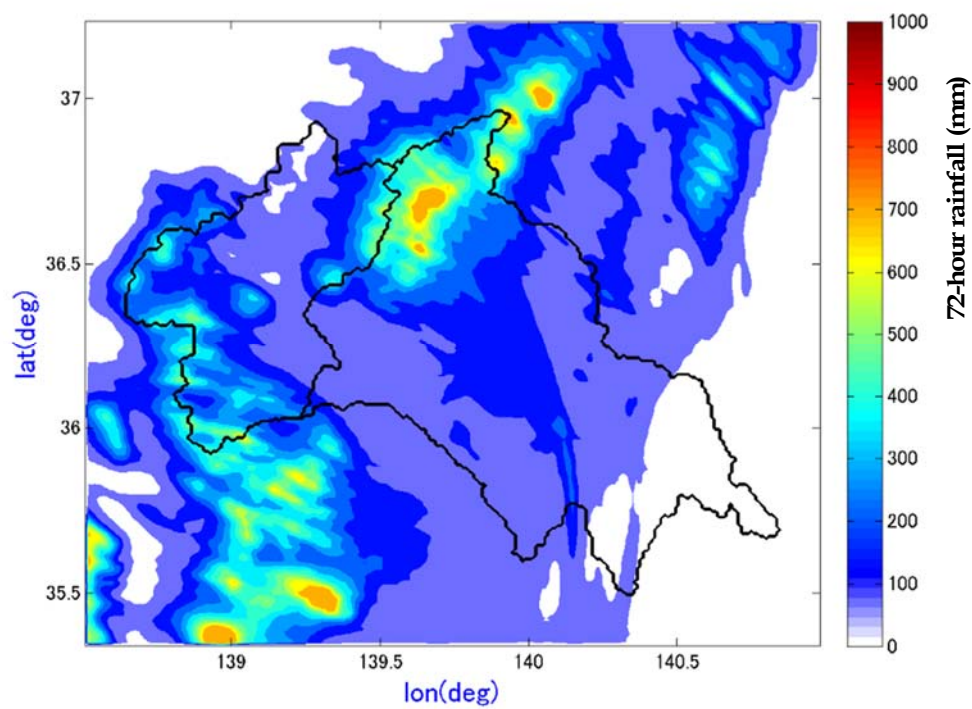


(b) 再現計算雨量の平面分布

図 3.23 72 時間解析雨量と再現計算結果の平面分布の比較(豪雨 5 2006. 07. 19)



(a) 解析雨量の平面分布



(b) 再現計算雨量の平面分布

図 3.24 72 時間解析雨量と再現計算結果の平面分布の比較(豪雨 6 2007. 09. 07)

3.4 結語

第3章では、気象モデルによる気象条件と降雨の物理的な関係把握のために気象モデル WRF の再現性について検討を行うため、データの選定、最適なパラメータの検討を行い、検討対象 6 豪雨の再現性について評価した。第3章において得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 前線性豪雨である豪雨 5，および台風性豪雨である豪雨 6 に対して，物理パラメタリゼーションを変更した再現性の検討から，WRF Domain Wizard の初期設定のまま Case1 として設定した以下のパラメータの再現性がもっとも高い。
 - ・ 雲微物理スキーム・・・・・・・・・・WSM 3-class simple ice scheme
 - ・ 境界層スキーム・・・・・・・・・・YSU scheme
 - ・ 積雲対流パラメタリゼーション・・Kain-Fritsch scheme
 - ・ 長波放射スキーム・・・・・・・・・・rrtm scheme
 - ・ 短波放射スキーム・・・・・・・・・・Dudhia scheme
- (2) 6 豪雨の八斗島上流平均 72 時間雨量に対する再現性は 68%から 168%の間にあった。また，最大 1 時間流域平均雨量に関しては 70%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っている。
- (3) 解析雨量と再現計算結果の時間分布，平面分布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。

以上の気象モデル WRF を用いて第4章において気象条件の変化が豪雨の時空間分布に与える影響の検討を行う。

第 3 章の参考文献

- 1) National Center for Atmospheric Research : ARW Version3 Modeling System User's Guide
http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/ARWUsersGuideV3.pdf, 2013.
- 2) Dudhia J., WRF Modeling System Overview.
http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/tutorial/201107/WRF_Overview_Dudhia.ppt.pdf, 2011.
- 3) Dudhia J., Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46(20), pp. 3077-3107, 1989.
- 4) Morrison H. , Curry J.A. and Khvorostyanov V.I. , A new double-moment microphysics parameterization for application in cloud and climate models, Part I: Description, *Journal of the atmospheric sciences*, 62(6), pp. 1665-1677, 2005.
- 5) Reisner J., Rasmussen R.M. and Brientjes R.T., Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 124(548), pp. 1071-1107, 1998.
- 6) Thompson G., Rasmussen R.M. and Manning K., Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme, Part I: Description and sensitivity analysis, *Monthly Weather Review*, 132(2), pp. 519-542, 2004.
- 7) Hong S. Y. and Lim, J. O. J., The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6), *J. Korean Meteor. Soc*, 42(2), pp. 129-151, 2006.
- 8) 中西幹朗, 大気境界層: モデル研究を中心に, 日本気象学会創立 125 周年記念解説, 109:4011 (乱流 ; 局地予報 ; 霧), pp. 7-10, 2007.
- 9) Hong S.Y., Noh Y. and Dudhia J., A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes, *Monthly Weather Review*, 134(9), pp. 2318-2341, (2006).
- 10) Mellor G.L. and Yamada T., Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Reviews of Geophysics*, 20(4), pp. 851-875, 1982.
- 11) Janjic Z.I., Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP Meso model, NCEP office note, 437, p. 61, 2002.
- 12) Nakanishi M. and Niino H., An improved Mellor-Yamada level-3 model: its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog, *Boundary-layer meteorology*, 119(2), pp. 397-407, 2006.
- 13) Kain J.S., Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme., The representation of cumulus convection in numerical model, *Meteor. Monogr*, 46, pp. 165-170, 1993.
- 14) Mlawer E.J., Taubman S.J., Brown P.D., Iacono, M. J. and Clough S.A., Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, *Journal of geophysical research*, 102(D14), pp. 16663-16682, 1997.

- 15)Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J., Shephard M.W., Clough S.A. and Collins W.D., Radiative forcing by long - lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 113(D13)., 2008.
- 16)Dudhia J., Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, *J. Atmos. Sci.*, 46, pp. 3077-3107, 1989.
- 17)Chou M.D., and Suarez M.J., An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models, NASA Tech. Memo, 104606(3), p. 85, 1994.
- 18)仲野久美子・仲吉信人・Alvin C.G. Varquez・神田学・足立幸穂・日下博幸：最新の都市パラメタリゼーションを導入した集中豪雨シュミレーション, 土木学会論文集 B1(水工学), 69(4), pp.355-360, 2013.

第4章 気象条件の変化が豪雨の時空間分布に与える影響

4.1 概説

第4章においては、第3章において再現性を確認した気象モデル WRF を用いて気象条件の変化と降雨量および降雨の時空間分布に与える影響を評価することにより気象条件と降雨の物理的な関係を把握する。

検討は、八斗島上流域の降雨量に影響を及ぼす気象条件として、WMO の手法¹⁾などで用いられている可降水量、継続的な水蒸気の供給の観点から水蒸気フラックスについて降雨量との相関関係を検討することにより最適な指標を選定する。

選定した指標に影響を及ぼす気象要素を変化させた検討ケースを設定し、WRF を用いて降雨量を算定して、指標の「気圧面毎」、「継続時間毎」の値と最も相関の高い指標の算定を行う。このような検討を 12 時間、24 時間、および 72 時間の降雨継続時間毎、さらに八斗島上流域とその小流域である烏・神流川流域、吾妻川流域、および奥利根流域について指標と降雨量の関係式を作成する。すなわち、3 つの継続時間について 4 つの対象流域の関係式を作成することであり、 $3 \times 4 = 12$ の関係式の作成を行う。さらに、指標の変化が降雨の時間分布、および空間分布に与える影響について降雨成因ごとに考察を行う。

以上の指標と降雨の関係式と時空間分布に与える影響から、第5章において可能最大降水量(PMP)とその時空間分布を作成するための基礎資料とする。

4.2 影響の検討手法

4.2.1 降雨に影響を与える気象条件の検討方法

(1) 流域規模での気象条件の最大化に用いるデータ

最大化の対象とする可降水量、水蒸気フラックスの算定には、気温、相対湿度、および風速などの値が必要である。これらの気象要素の観測値は関東に 1 地点しかない高層気象観測を除けば気象官署における地上観測に限定される。気象官署は平面的な位置、密度から河川流域の気象現象を代表する位置にかならずしも存在しておらず、気象要素の鉛直分布も得られていない。

そこで、本研究では、気象庁のメソ客観解析データを用いて豪雨時の可降水量、風速などを評価する。メソ客観解析データは、2001 年 3 月以降 3 時間、または 6 時間毎の気象データが 10km 格子において、気圧、気温、風速、相対湿度が 20 層(相対湿度は 11 層)について整理されている。メソ客観解析データの格子点と気象官署の位置関係を図 4.1 に示す。この、メソ客観解析データを用いることにより、利根川基準点である八斗島上流域において、約 40 箇所の鉛直分布を持つ気象要素を用いることができる。また、2000 年以前の再解析データがない期間は、気象官署の値を 2001 年以降のメソ客観解析データの値と地上観測値との相関関係から補正して用いる。雨量データに関しては、2001 年以降は解析雨量を、2000 年以前は気象庁アメダス観測所のデータからテーパー法により流域平均雨量を作成した。

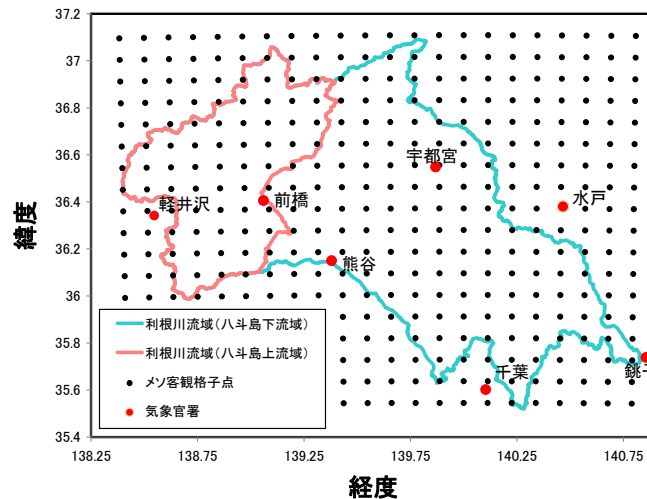


図 4.1 メソ客観解析の格子点と気象官署位置の関係

(2) 検討対象豪雨

本検討で対象とする9降雨を表 4.1 に示す。豪雨番号1～6は、第2章において検討対象豪雨として選定した2001年以降のメソ客観解析データが得られ、八斗島実績流量が $2000\text{m}^3/\text{s}$ 以上の降雨である。八斗島上流域の72時間雨量としては概ね $100\sim 260\text{mm}$ の範囲である。これは、利根川水系河川整備基本方針の基本高水に関する資料⁹⁾より10年確率以下から50年確率の降雨規模となっている。豪雨番号7～9は、2000年以前の地上観測データについて、アメダス観測データが得られる近年の範囲で降雨規模が上位の降雨である。これらの3降雨は、八斗島上流域の25箇所のアメダス観測所から流域平均雨量の算定を行い、流域周辺の気象官署の気温、相対湿度、風速などの地上観測データを整理する。以上の9降雨の内、豪雨番号5を除く8降雨は台風、あるいは前線を伴う台風であり、台風性降雨が利根川水系の主要洪水時の降雨要因となっていることがわかる。

表 4.1 本研究の対象降雨

豪雨番号	期間	八斗島上流域 平均72時間雨量 (mm)	八斗島流量 (m^3/s)	降雨要因
1	2001/09/10	175.2	6,785	台風15号
2	2002/07/11	159.2	5,973	台風6号, 梅雨前線
3	2004/10/09	98.4	2,124	台風22号, 前線
4	2004/10/21	107.6	3,729	台風23号, 前線
5	2006/07/19	225.8	2,929	梅雨前線
6	2007/09/07	258.3	7,756	台風9号
7	1982/08/02	245.1	7,992	台風10号
8	1982/09/13	220.7	8,192	台風18号, 前線
9	1998/09/16	191.3	9,223	台風5号

(3) メソ客観解析データを用いる必要性

検討対象とした 2001 年以降の 6 豪雨についてそれぞれ、高層気象観測が行われている館野観測所のデータと館野観測所に最も近いメソ客観解析データについて比較を行った。比較対象としたのは、欠測期間を除いて得られた合計 70 回の観測について、地上面から 300hPa 気圧面までの水蒸気量の合計である可降水量((4.1)式)を比較したところ、図 4.2 に示すように相関係数が 0.97 と高い相関が得られた。各時間の可降水量の誤差は平均 2%、最大 24%であった。

$$W_p = \frac{1}{g} \int_{P_{sfc}}^{300} q dp \quad (4.1)$$

ここに、 W_p ：可降水量， g ：重力加速度， q ：比湿， P_{sfc} ：地表面の気圧である。

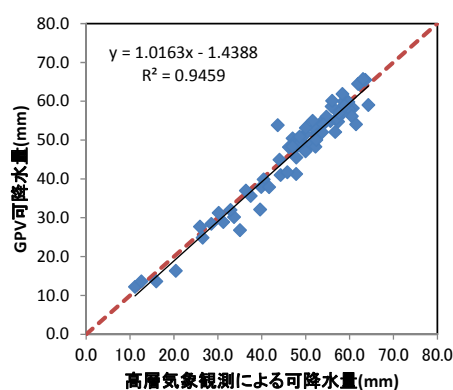


図 4.2 可降水量の比較

また、メソ客観解析データを用いた比湿の鉛直分布と、地上観測値を偽湿潤断熱過程として作成した前橋地点における鉛直分布の比較例を図 4.3 に示す。1～6 の豪雨の内、流域平均 72 時間雨量が最も大きい 2007 年 9 月降雨では、降水量のピーク時である 2007/09/07 5:00 には、メソ客観解析データの方が全層的に大きくなっている。その他の豪雨も、降雨ピーク時にはメソ客観解析データから算定した比湿が大きくなる傾向が見られた。このような傾向を踏まえ、豪雨時の気象条件の算定には、メソ客観解析データを用いて精度向上を図る必要がある。

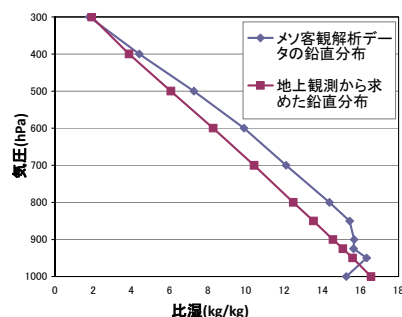


図 4.3 メソ客観解析データを用いた比湿の鉛直分布 (豪雨 6: 降雨ピーク時)

(4) 降雨に与える気象条件の設定方法

豪雨時の降雨に影響を与える気象要素として、WMO の考え方¹⁾では、式(4.1)に示すように地上面から 300hPa 気圧面までの可降水量による評価を基本としている。ここで、降水量に影響を与える気象条件としては、様々な指標が考えられる。利根川流域のように主要洪水の降雨要因が台風性で降雨継続時間が長い流域では、水蒸気の流入を表す水蒸気フラックスが降水量に影響を及ぼすと考えられる。そのため、可降水量および水蒸気フラックスと降雨との相関を検討し、降雨との相関の高い気象要素を用いて可能最大降水量の算定に用いる指標とすることとする。ただし、気層毎の水蒸気フラックスは、気圧面毎に水蒸気混合比を算定して風速を乗じることにより算定した上下の水蒸気フラックスの算術平均値とした。たとえば、800hPa と 850hPa における水蒸気フラックスの算術平均値を 850～800hPa の気層における水蒸気フラックスとした。

4.2.2 気象条件の変化が降雨に与える影響の検討方法

気象条件の変化が降雨に与える影響を物理的に評価するために、第 3 章において再現性を確認した WRF モデルを用いて気象条件を変化させて継続時間毎の雨量と時空間分布に与える影響を検討する。気象条件と継続時間毎の雨量の相関の高い指標は、1 時間毎の計算出力値から、1000～300hPa の各気圧面において指標を計算し、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、各継続時間の指標の 12, 24, 72 時間雨量との相関について検討を行い、最も相関の高い指標に対する気圧面と継続時間を決定する。

4.3 降雨に影響を与える気象条件の評価

4.3.1 流域内の気象条件の評価に用いる観測所の検討

(1) 水蒸気の流入方向からの評価

流域内の可降水量、水蒸気フラックスなどの評価はメソ客観解析データを用いて行う。しかし、2000 年以前の豪雨についても評価を行うため、流域内の気象条件と相関の高い気象官署を選定する必要がある。WMO の PMP マニュアル¹⁾では、可能最大降水量の検討対象とする流域と水蒸気源の間に位置する観測所の値を用いて、豪雨時、過去最大の可降水量を評価することとしている。これは、対象地域への水蒸気の流入が流域内の降雨に影響を与えるという考え方である。2001 年以降の 6 豪雨の降雨ピーク付近の風向が図 4.4 の豪雨 6 の例に示すように北東～東方向であることが確認されたため、八斗島上流域の前橋観測所が評価対象観測所に該当すると考えられる。そこで、メソ客観解析データの得られている豪雨を用いて、流域内の値との相関を確認した上で、前橋観測所の妥当性に関して評価する。

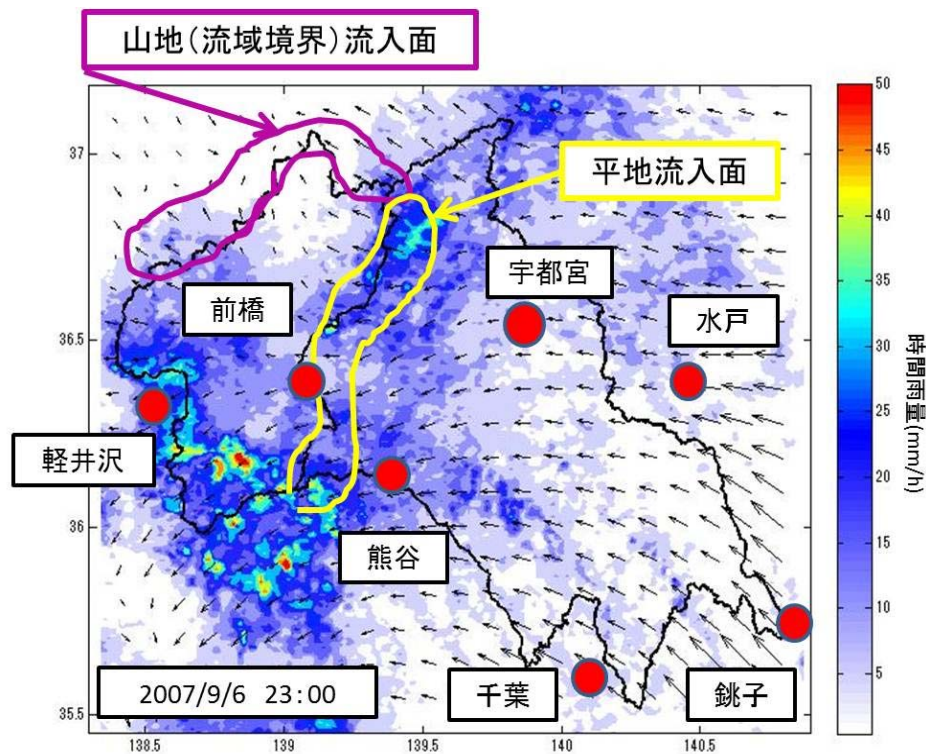


図 4.4 豪雨 6 の降雨ピーク時の降雨量と風速ベクトル

(2) 八斗島流域と前橋地点における気象要素の関係

八斗島流域平均値、および前橋地点におけるメソ客観解析データを用いて算定した可降水量、水蒸気フラックスの関係を 2001 年以降の 6 豪雨について検討した。八斗島流域平均値は流域内に位置する格子点の算術平均値とした。

図 4.5 は 12 時間最大水蒸気フラックスの時間平均値(以下、12 時間最大水蒸気フラックスと記す)について、八斗島上流域平均値と前橋地点の関係を示したものであり、相関係数は 0.99 と高い相関が見られた。図 4.6 に示すように、可降水量で評価した場合にも同様に相関係数は 0.99 と高く、水蒸気フラックス、可降水量ともに八斗島流域上流の値を前橋地点におけるメソ客観解析データを用いて表すことができることがわかった。

次に、メソ客観解析データと地上観測値の両方が存在する 2001 年以降の豪雨について水蒸気フラックス、可降水量の値の関係を検討し、2000 年以前の地上観測データからの値の補正の方法について検討した。水蒸気フラックスに関しては、図 4.7 に示すように相関係数が 0.94 の関係で地上観測からのフラックスとメソ客観解析データを用いたフラックスの関係が得られた。この関係を用いて、豪雨 7~9 の地上観測から算定された水蒸気フラックスを補正することとした。このような地上観測値と 850-800hPa の層における水蒸気フラックスとの関係は、前橋の東側に位置する宇都宮観測所を対象とした場合、また、降雨成因が梅雨前線である豪雨を加えた場合は相関係数に低下が見られた。したがって、検討対象流域と気象官署の位置関係、降雨要因などを考慮して、過去の地上観測データの評価に用いる精度を対象流域毎に把握する必要があると考えられる。また、可降水量に関しても前橋地上観測値からの可降水

量とメソ客観解析データを用いた値の相関係数は図 4.8 に示すように 0.91 と良好な関係が得られている。

以上の結果から、メソ客観解析データを用いた八斗島流域内の値と前橋地点の値は相関が高いこと、前橋地点のメソ客観解析データを用いた値と地上観測結果との相関が高いことから、可降水量、水蒸気フラックスとも八斗島流域内の気象条件を地上観測による結果も含め、前橋地点で評価できるといえる。

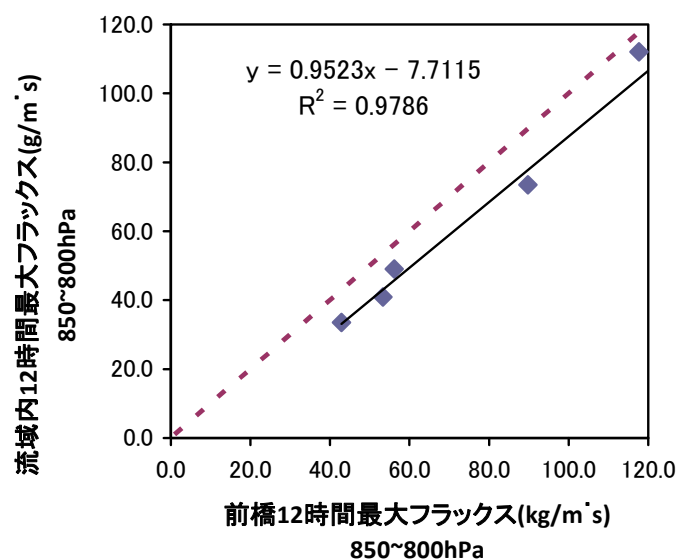


図 4.5 八斗島流域内と前橋の水蒸気フラックスの関係

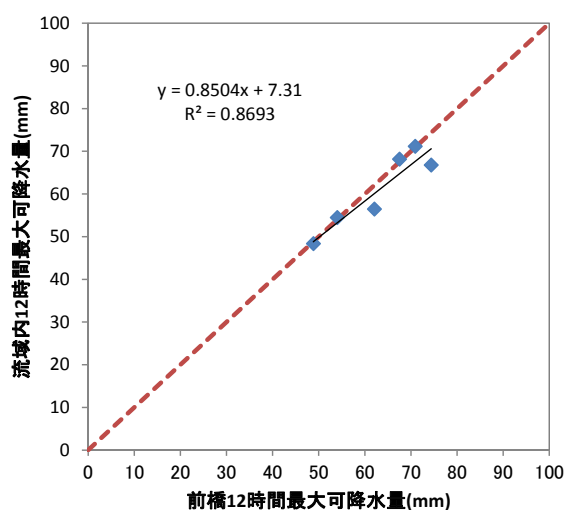


図 4.6 八斗島流域内と前橋の可降水量の関係

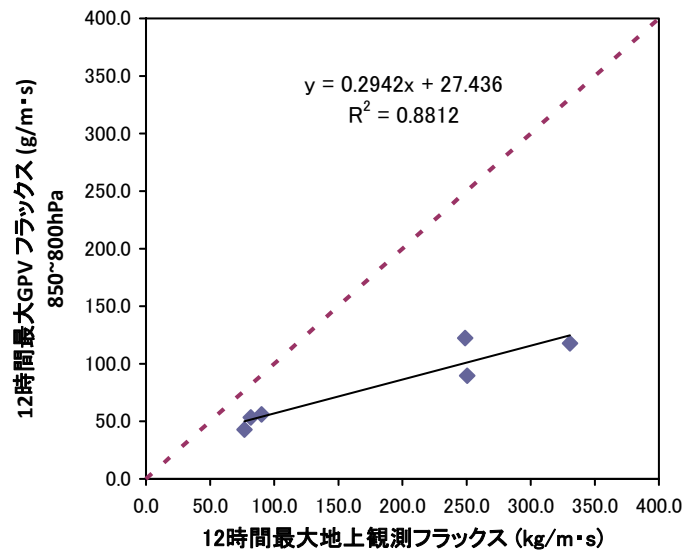


図 4.7 前橋地点のメソ客観解析と地上観測からの水蒸気フラックスの関係

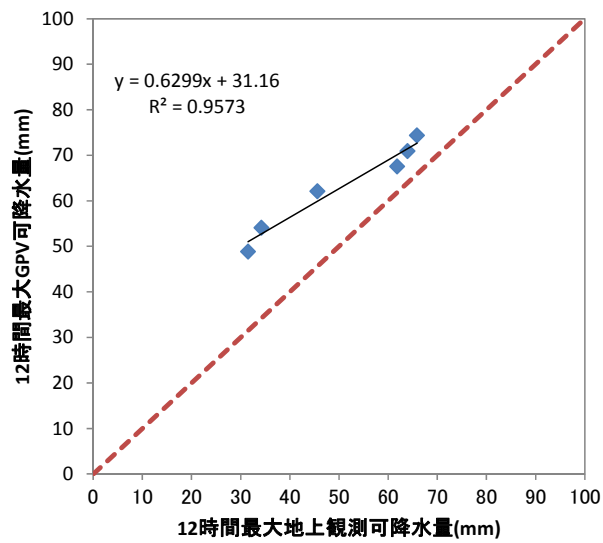


図 4.8 前橋地点のメソ客観解析と地上観測からの可降水量比較

4.3.2 可降水量と降水量の関係

前橋地点においてメソ客観解析データを用いて算定した可降水量と八斗島流域平均 72 時間雨量との相関は、2001 年以降の台風性の 5 豪雨について評価すると、図 4.9 に示すように 3～12 時間最大可降水量において 0.9 以上の相関関係がある。しかし、この結果に 72 時間雨量が概ね 200mm 以上の豪雨 7～9 を加えて評価すると、図 4.10 に示すように相関係数は 0.58 に低下し、規模の大きな実績降水量を評価する指標として適用性が高いとはいえない結果となった。

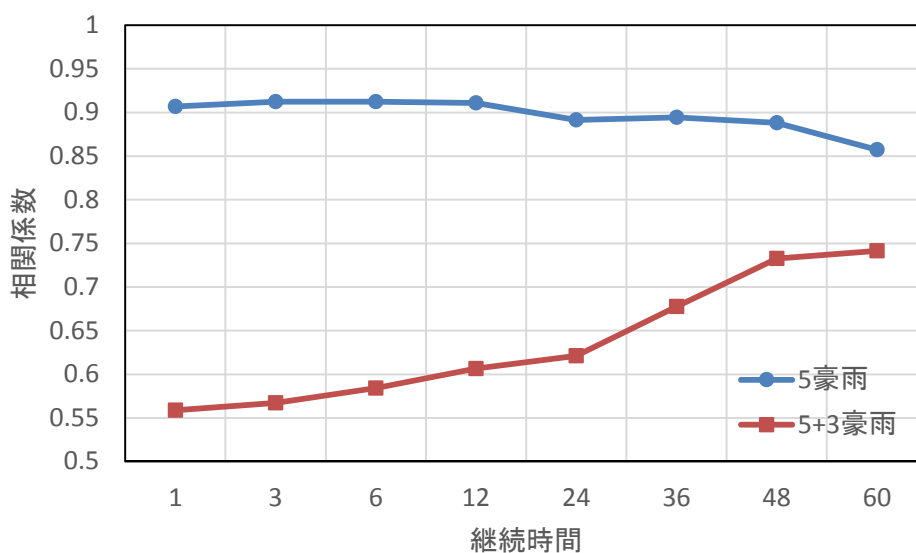


図 4.9 継続時間毎の可降水量と八斗島上流域平均 72 時間雨量の関係

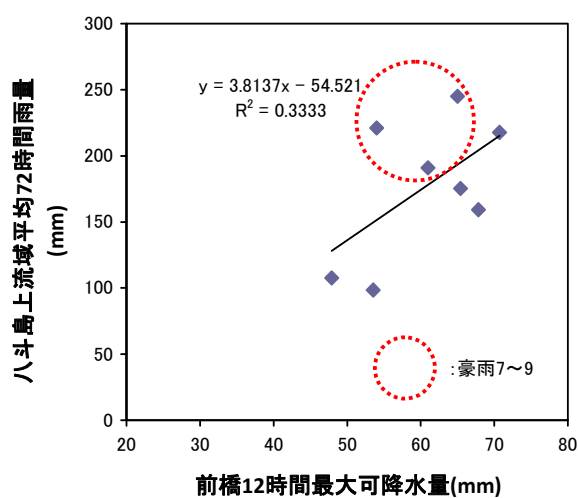


図 4.10 可降水量と八斗島上流域平均 72 時間雨量の関係

4.3.3 水蒸気フラックスと降水量の関係

気層毎，継続時間毎の水蒸気フラックスと対象降雨の 72 時間雨量との関係を検討した．例として，図 4.11 に示した 12 時間最大水蒸気フラックスとの関係は，台風性の 5 豪雨に対して地上から 700hPa の層では相関係数が 0.8 以上と高く，その中で 850-800hPa の層との相関係数が 0.99 と最も高くなった．同様に 900-850hPa の 6 時間最大水蒸気フラックスとの相関係数も 0.99 と高かった．ただし，降雨継続時間が 72 時間雨量と継続時間が長いこと，および，WMO マニュアルでは継続時間 12 時間の水蒸気の流入を最大化指標としていることから 850-800hPa の気層の 12 時間最大水蒸気フラックスを豪雨の最大化に用いる指標として望ましいと考えられた．

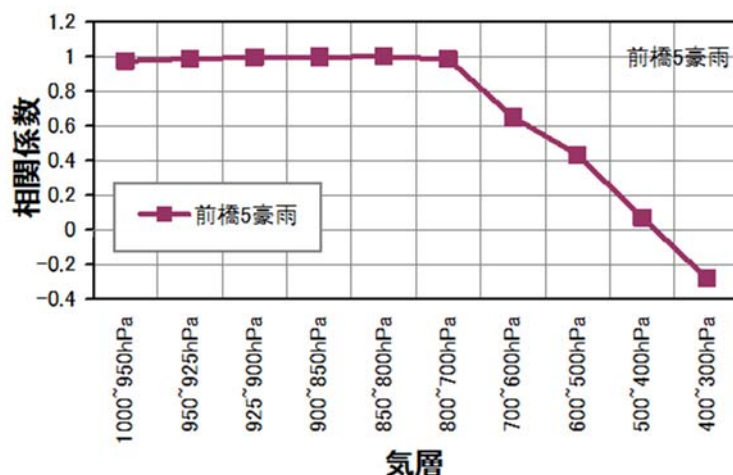


図 4.11 気層毎の 12 時間最大水蒸気フラックスと八斗島流域平均 72 時間雨量との相関係数

そこで，前項の図 4.7 で把握した地上観測との関係を用いて 2000 年以前の 3 豪雨(豪雨 7~9)の 850-800hPa に相当する水蒸気フラックスに補正を行い，降水量との相関を時間毎に算定すると図 4.12 が得られた．この図から分かるように，降雨継続時間が 12 時間以下の範囲では，相関係数 0.80 以上の良好な相関が得られた．ただし，短時間での最大水蒸気フラックスは，流域平均最大雨量の後の時間で生じている場合もある．そこで先の検討とあわせて，12 時間最大水蒸気フラックスを降水量に影響を与える指標として用いることとした．

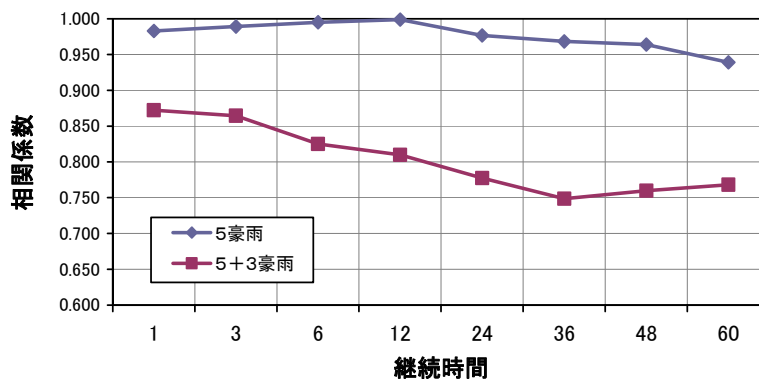


図 4.12 継続時間毎の水蒸気フラックスと八斗島流域平均 72 時間雨量との相関係数

850-800hPa の 12 時間最大水蒸気フラックスと八斗島上流域平均 72 時間雨量との関係は図 4.13 に示すように、相関係数が 0.81 となった。豪雨時の降水量に影響を及ぼす指標としては、WMO マニュアル¹⁾では地形性降雨の影響を受けない地域では可降水量を用いて最大化を行っているが、地形性降雨の影響を受ける地域は風の影響も考慮している。また、Fernando ら²⁾は、海岸沿いの地形性降雨の影響の少ない地域では可降水量の影響が大きいこと、降雨ピーク付近の降水変換効率が低い時間帯では可降水量の影響が大きいと述べ、24 時間雨量については可降水量と風速を考慮した最大化が適切であるとしている。これらの知見から、本研究で対象とした利根川上流域のように標高 1500m 以上の山地から成り、72 時間雨量を対象とする場合は、可降水量と風速を考慮した水蒸気フラックスの相関が高くなったものと考えられる。

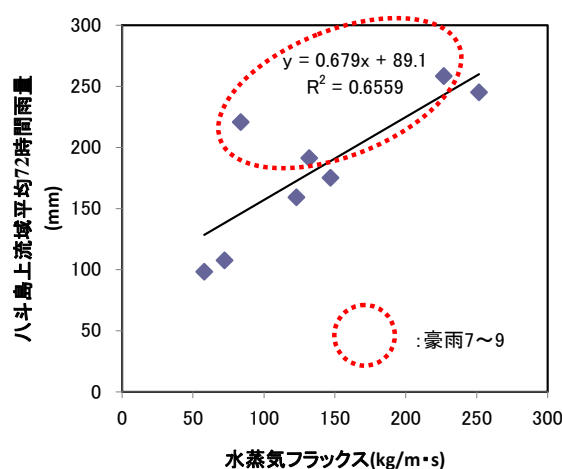
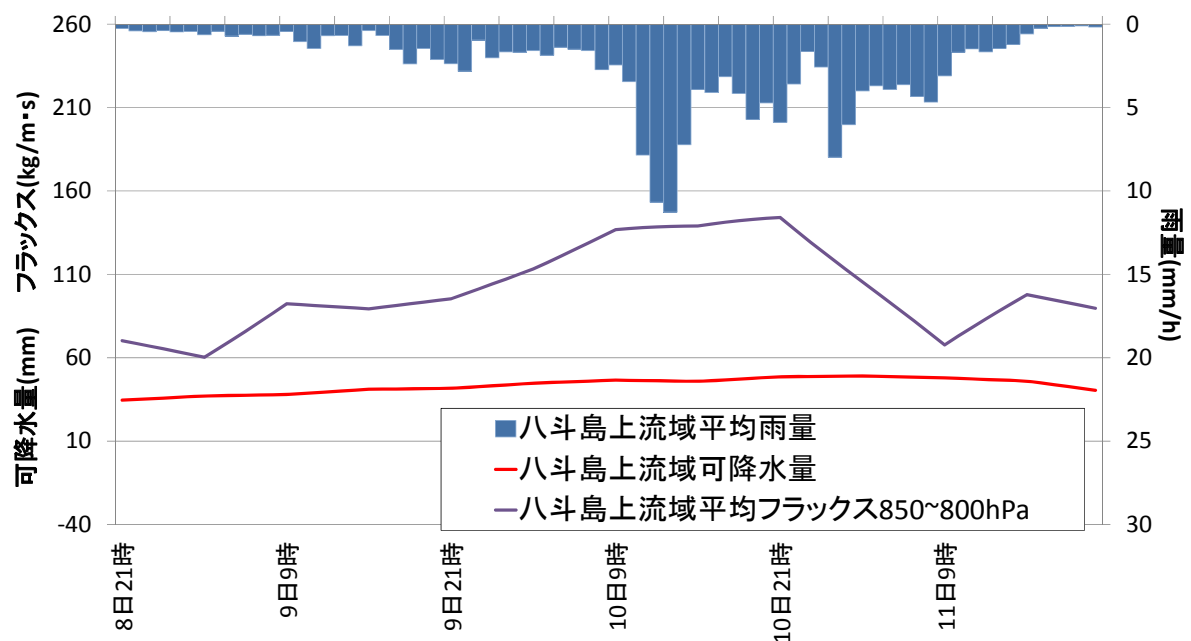
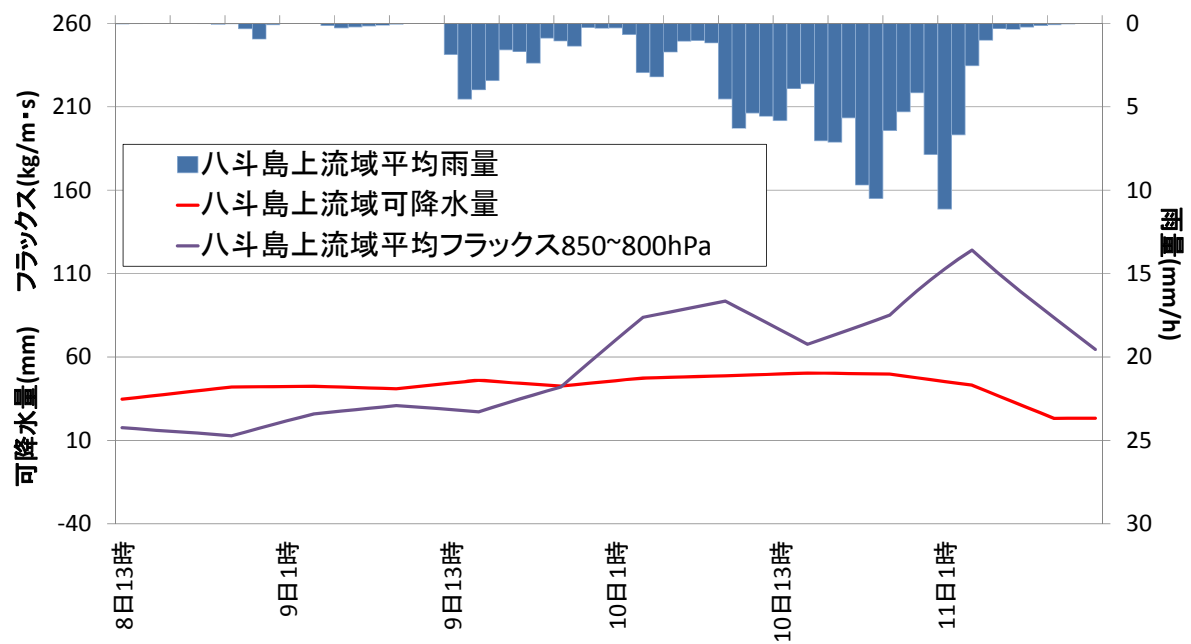


図 4.13 水蒸気フラックスと八斗島流域平均 72 時間雨量の関係

72 時間雨量と良好な相関が得られた 850-800hPa の水蒸気フラックスと可降水量について、降雨との時系列関係を図 4.14(1)～(3)に示す。水蒸気フラックスの時間変化は、可降水量に比べて降雨の時間変化に対応した変動傾向を示している。

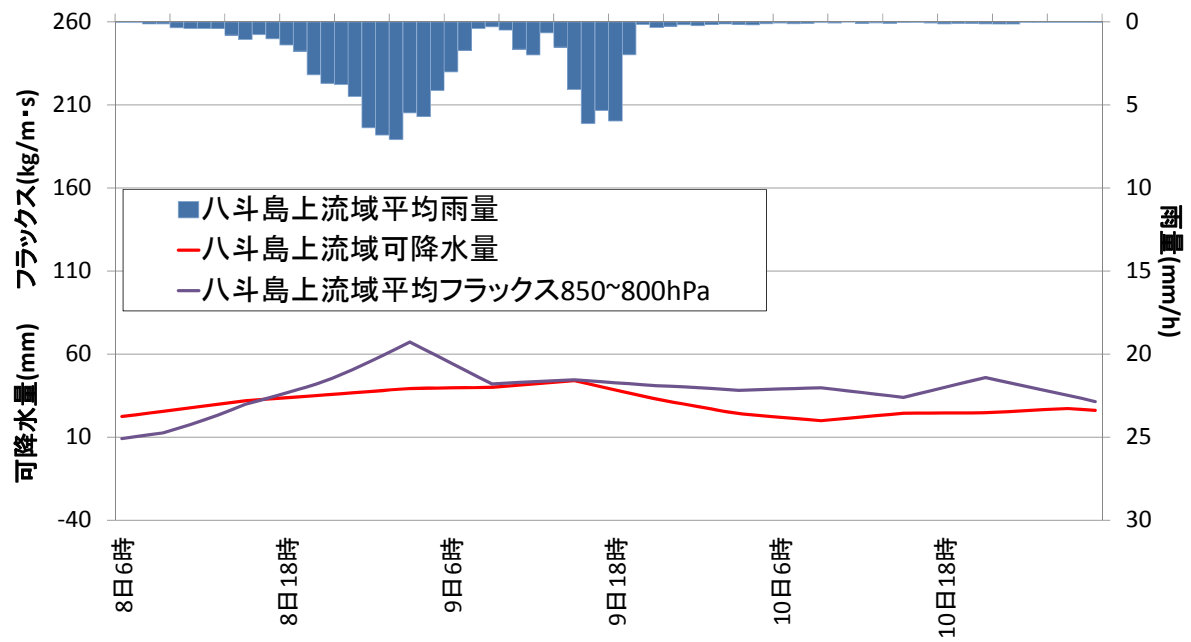


(a) 豪雨 1

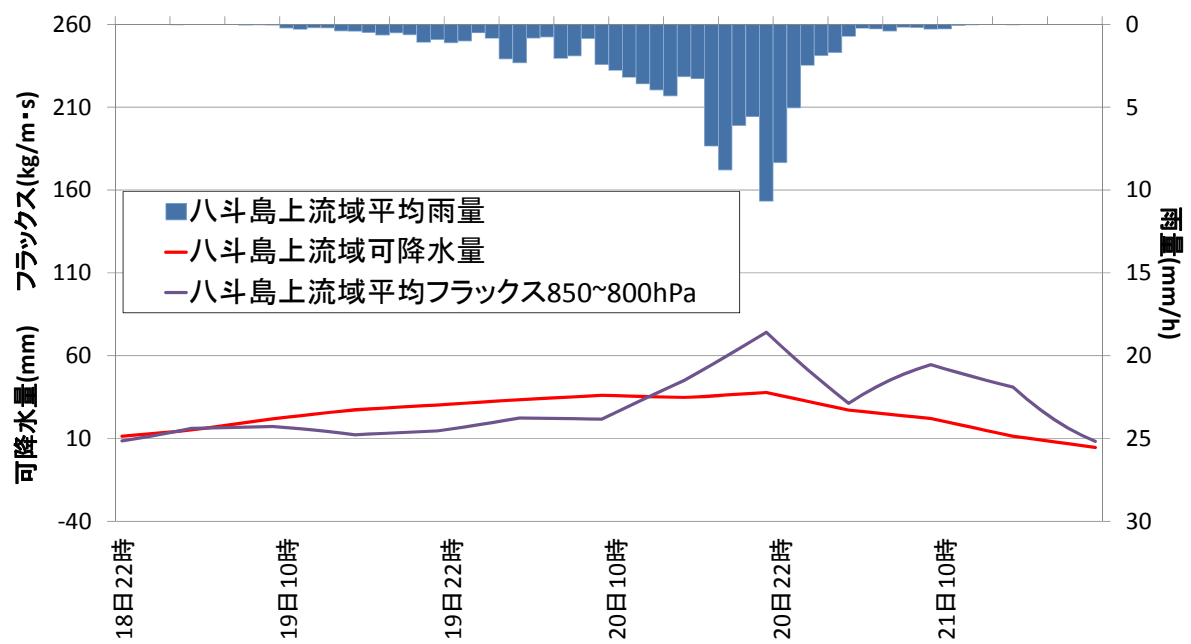


(b) 豪雨 2

図 4.14(1) 水蒸気フラックスと八斗島上流域平均雨量の時間変化 (豪雨 1, 2)

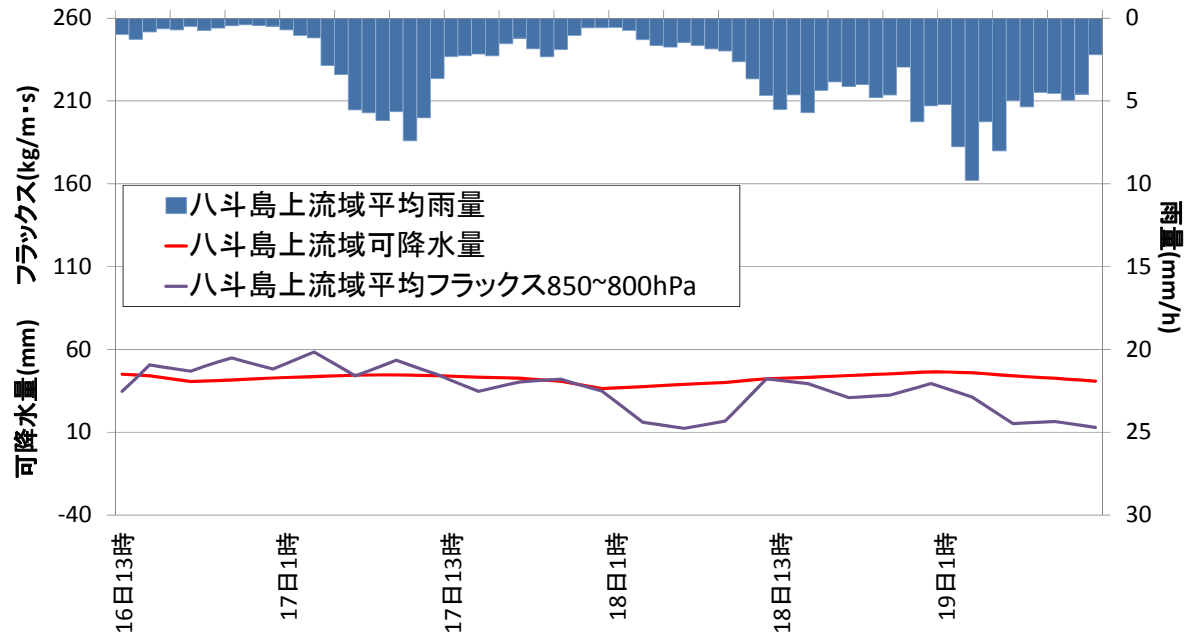


(c) 豪雨 3

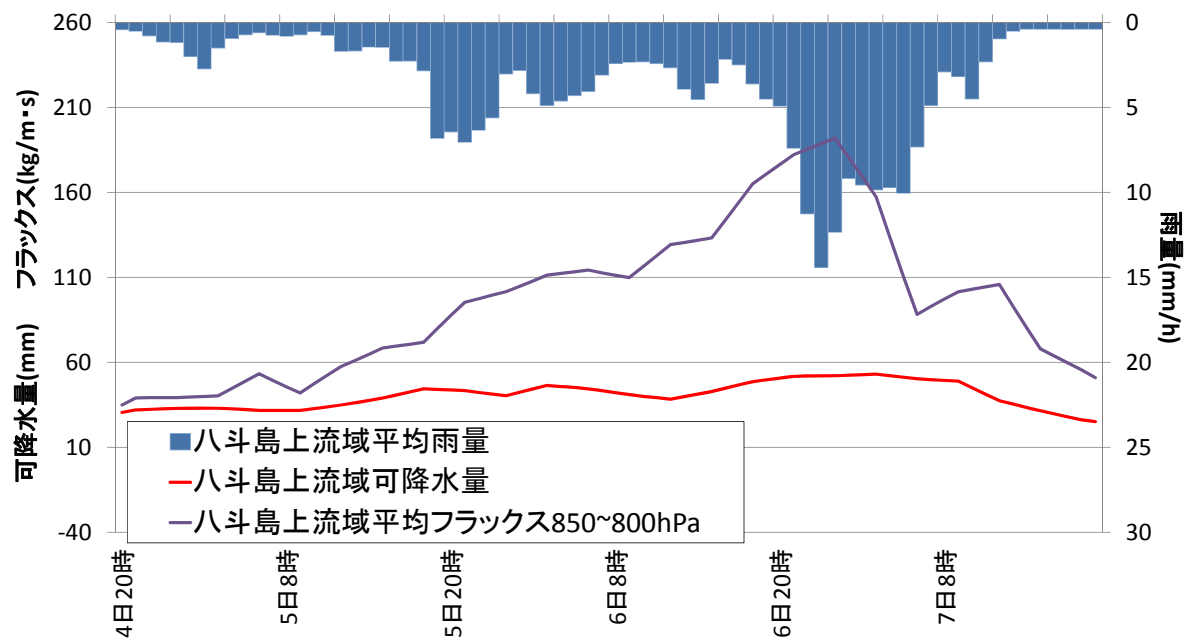


(d) 豪雨 4

図 4. 14(2) 水蒸気フラックスと八斗島上流域平均雨量の時間変化(豪雨 3, 4)



(e) 豪雨 5



(f) 豪雨 6

図 4. 14(3) 水蒸気フラックスと八斗島上流域平均雨量の時間変化(豪雨 5, 6)

4.3.4 降雨継続時間に対する水蒸気フラックスの相関

前項までの検討において、72 時間雨量に対しては、可降水量より水蒸気フラックスの相関が高い結果が得られている。ここでは、12 時間最大水蒸気フラックスと降雨継続時間が 12 時間から 72 時間の雨量の関係を示す。豪雨 5 を除く台風性の 8 豪雨を対象に、八斗島上流域の評価地点とした前橋地点における 850-800hPa 層の 12 時間平均値での最大水蒸気フラックスおよび参考として 12 時間平均値での最大可降水量を算定した。そして、それらの値と 12 時間から 72 時間の継続時間毎に八斗島上流域の最大流域平均雨量との相関係数を求めたものを図 4.15 に示す。水蒸気フラックスは各継続時間雨量に対して可降水量より高い相関係数を与えており、降雨継続時間が長くなるほど相関が高くなっている。降雨継続時間が 36 時間以上では相関係数が 0.77 以上となっており、直轄河川の降雨継続時間である 1~3 日程度の降水量の評価に 12 時間最大水蒸気フラックスがパラメータとして有効なことが分かる。

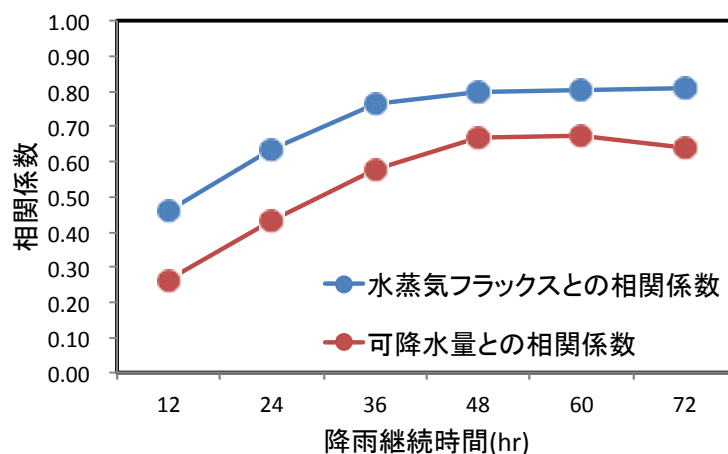


図 4.15 12 時間最大水蒸気フラックスと可降水量の降雨継続時間毎の最大降水量との相関

4.4 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 4.2 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、最小値は 0%とした。

表 4.2 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%	相対湿度を増加
5		＋30%	
6		最大化	全層の相対湿度を 100%

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り、風速を 1.17 倍、2.0 倍と増加させた場合の雨量変化を豪雨 6 について検討した。その結果、図 4.16 に示すように八斗島上流域の東側に水蒸気フラックスが集中するため八斗島上流流域外の降水量は増加しているが、その流域内における降水量は減利根川流域の顕著な雨量の増加につながらない結果となった。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、風速を変化させるケースは採用しないことにした。

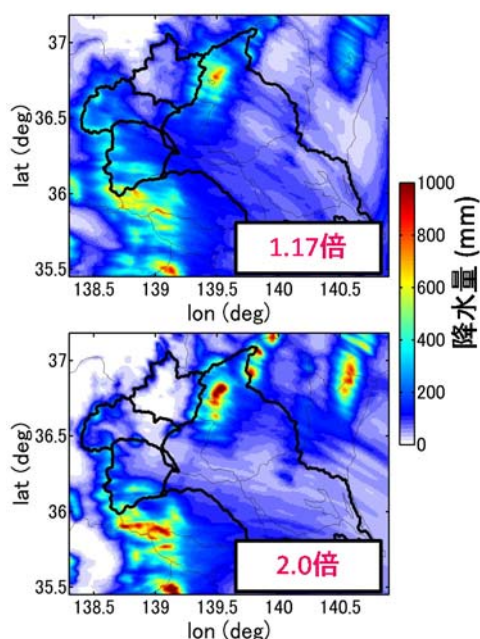
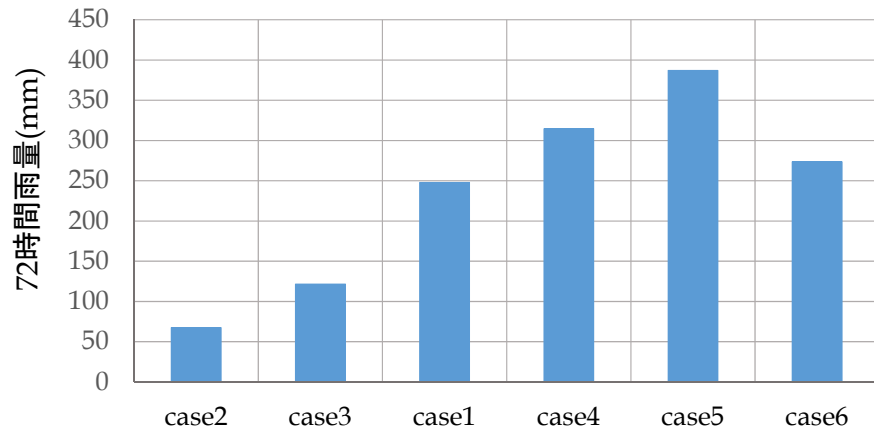


図 4.16 豪雨 6 の風速を変化させた 72 時間雨量

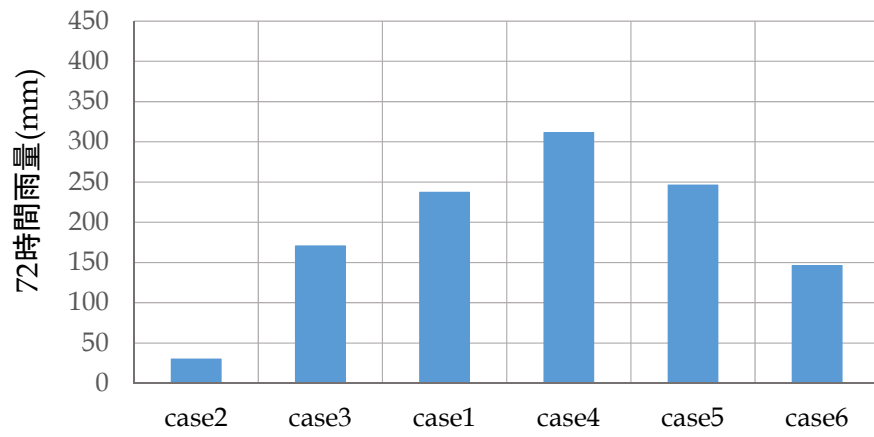
4.5 相対湿度の影響

4.5.1 継続時間毎の最大雨量に与える影響

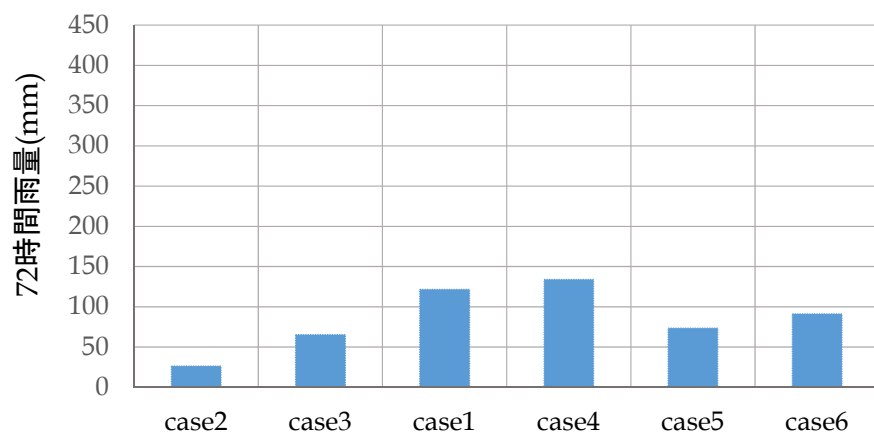
WRFを用いて相対湿度を変化させた八斗島上流域における72時間雨量の変化を図4.17に示す。この図から、相対湿度の変化による雨量の変化は台風、前線などの降雨成因によって異なることがわかる。前線を伴わない台風性豪雨である豪雨1,6は、相対湿度の増加に伴い72時間雨量も概ね増加する。一方、前線を伴う台風である豪雨2,3,4は、相対湿度が+10%から+30%で雨量が減少する。また、前線性豪雨である豪雨5は、再現計算時より相対湿度の増加により雨量が低下する結果となった。次に、八斗島上流域の12,24,および72時間流域平均雨量の変化を再現計算時の12,24,および72時間雨量で規準化して示したものが図4.18である。台風性豪雨を赤線、前線を伴う台風を青線、前線性豪雨を緑線で表している。この図から、12時間雨量および24時間雨量に関しても72時間雨量と同様な降雨成因毎の変化傾向がみられることが分かった。



(a) 豪雨 1

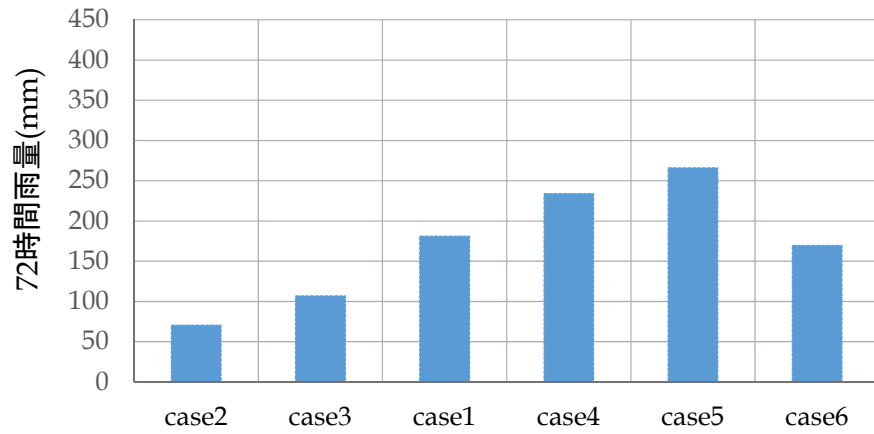


(b) 豪雨 2

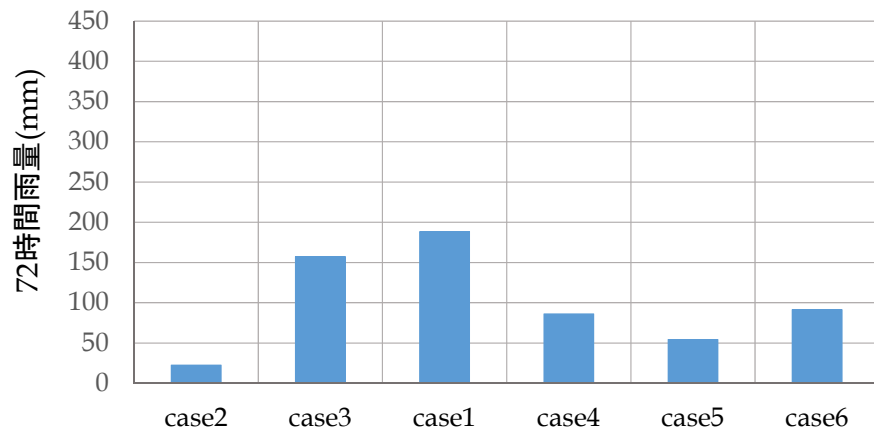


(c) 豪雨 3

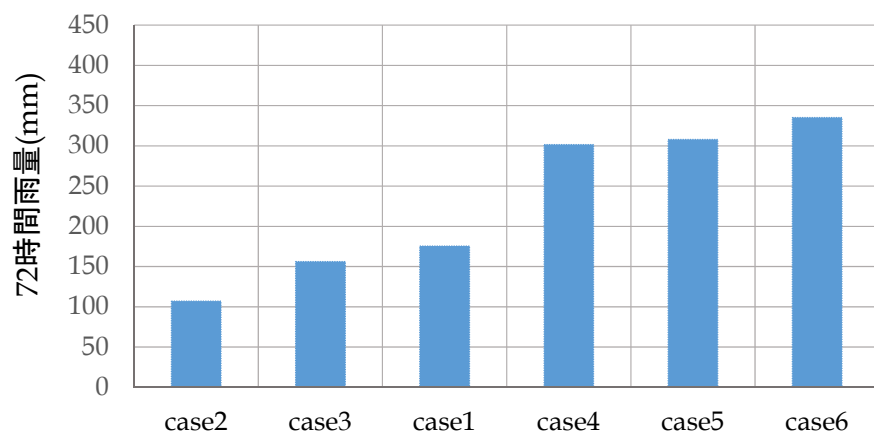
図 4.17(1) 各豪雨ケース毎の 72 時間雨量(豪雨 1, 2, 3)



(d) 豪雨 4

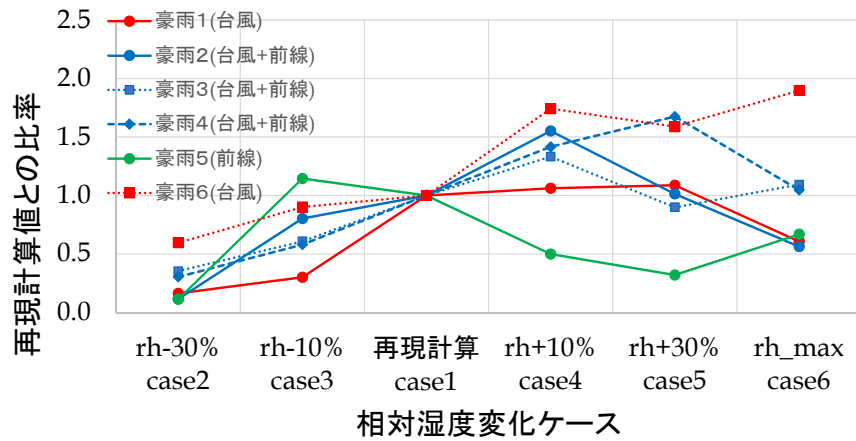


(e) 豪雨 5

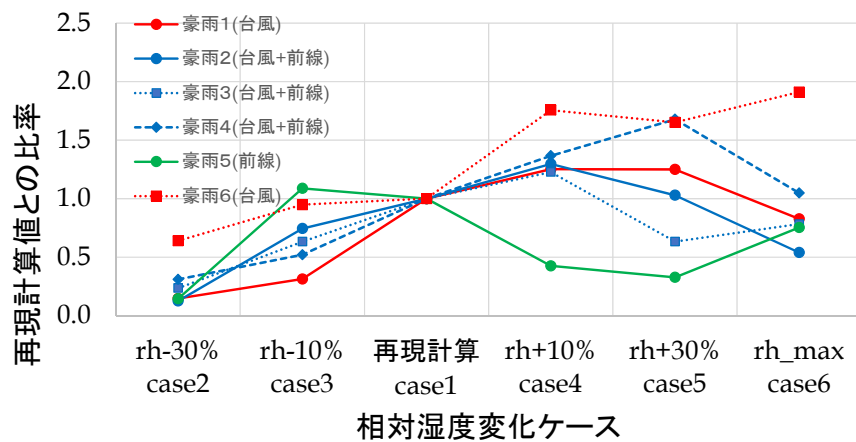


(f) 豪雨 6

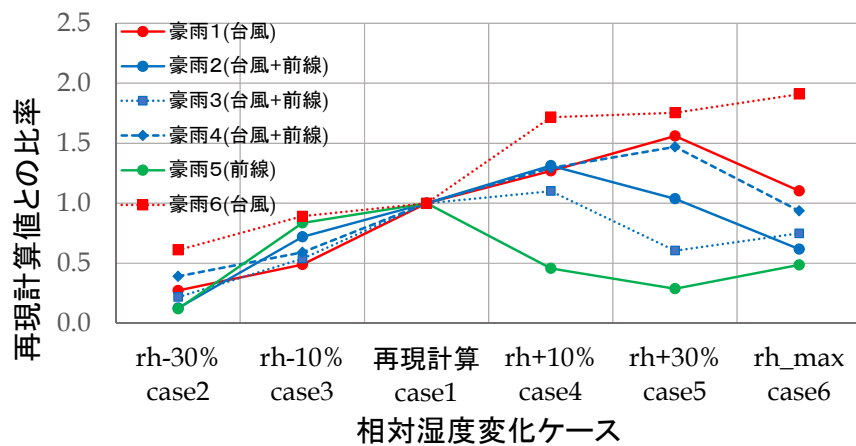
図 4.17(2) 各豪雨ケース毎の 72 時間雨量(豪雨 4, 5, 6)



(a) 最大 12 時間雨量



(b) 最大 24 時間雨量



(c) 最大 72 時間雨量

図 4.18 相対湿度の変化による降雨成因毎の最大雨量

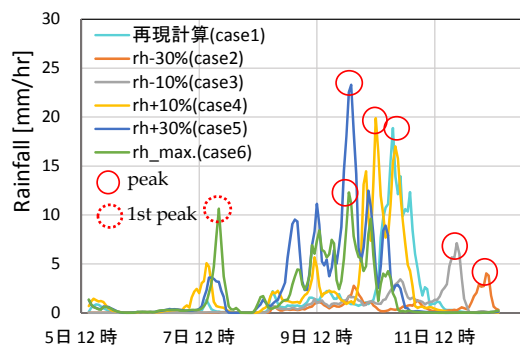
4.5.2 時間分布に与える影響

相対湿度の変化による八斗島上流流域平均雨量の時間分布の変化を図 4.19 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 4.19 (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 とともに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。

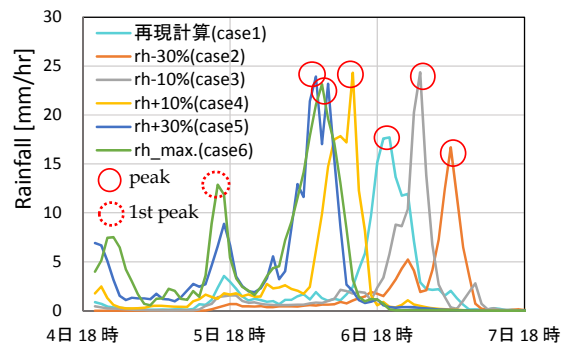
一方、前線を伴う台風である豪雨 2,3,4 に関しては相対湿度により雨量が変化しているが、台風性豪雨のようなピーク発生位置の変化や第 2 ピークの顕著な発生はなく、相対湿度に対する雨量の増加率も台風性降雨に比べて小さかった(図 4.19 (c), (d), (e) 参照)。図 4.19 (c) は実績 72 時間雨量の最も大きい豪雨 2 の例であるが、豪雨 3,4 についても同様な傾向であった。

図 4.19 (f) 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。

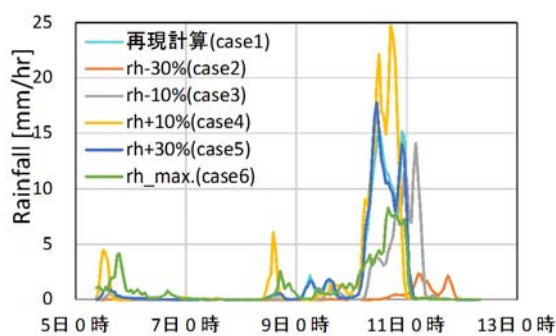
次に、烏・神流川流域、吾妻川流域、および奥利根流域における地域的な時間分布の変化を図 4.20～図 4.22 に示す。台風性豪雨(豪雨 1, 豪雨 6)では降雨ピークの発生位置が変化するなど降雨成因毎の時間分布に与える影響は八斗島上流域と同様となっていることが分かった。



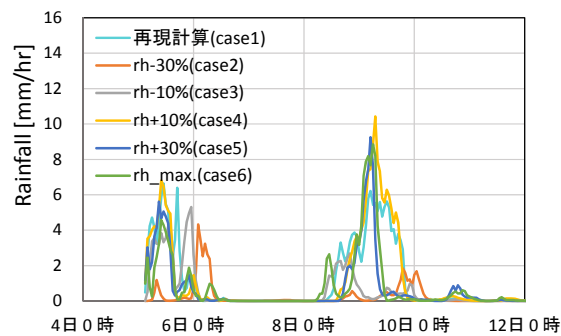
(a) 豪雨 1 (台風)



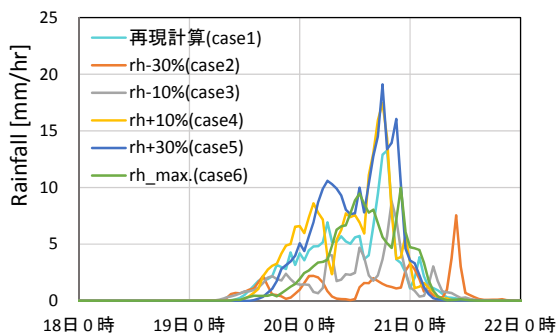
(b) 豪雨 6 (台風)



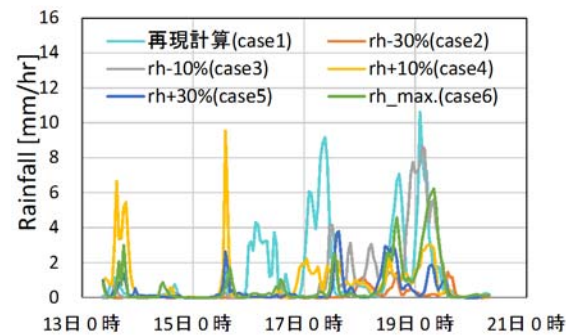
(c) 豪雨 2 (台風+前線)



(d) 豪雨 3 (台風+前線)

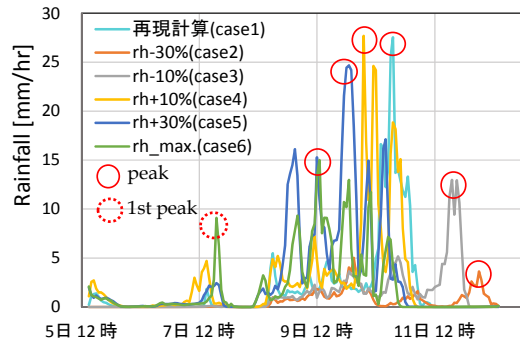


(e) 豪雨 4 (台風+前線)

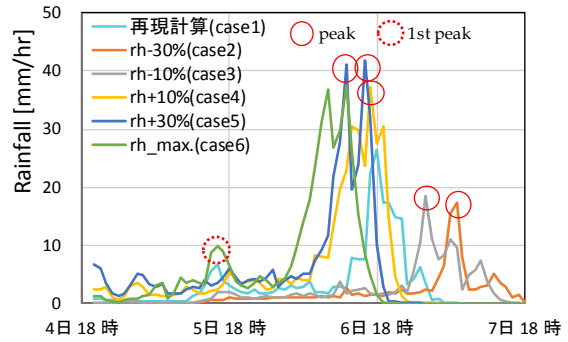


(f) 豪雨 5 (前線)

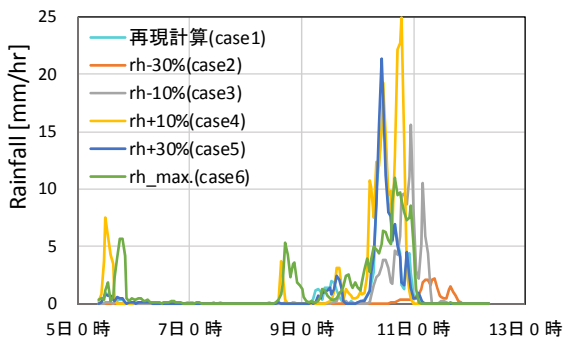
図 4.19 相対湿度の変化が降雨成因毎の時間分布に与える影響(八斗島上流)



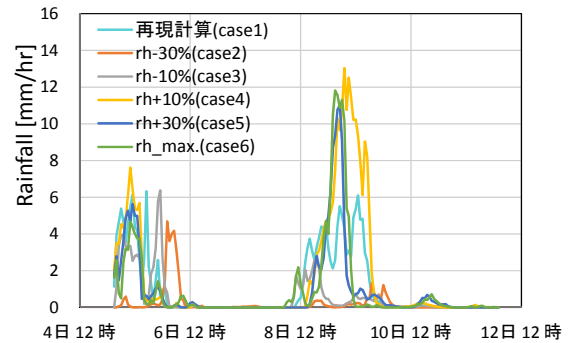
(a) 豪雨 1 (台風)



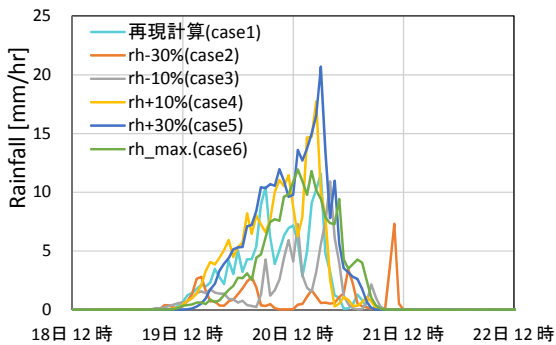
(b) 豪雨 6 (台風)



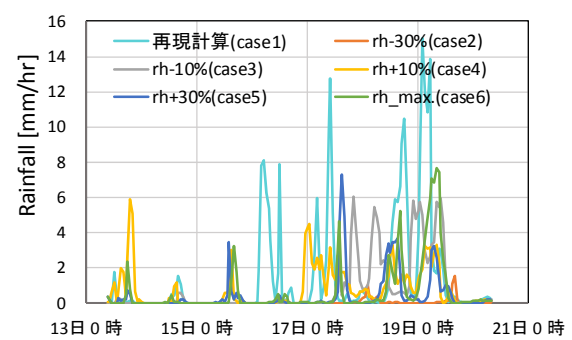
(c) 豪雨 2 (台風+前線)



(d) 豪雨 3 (台風+前線)

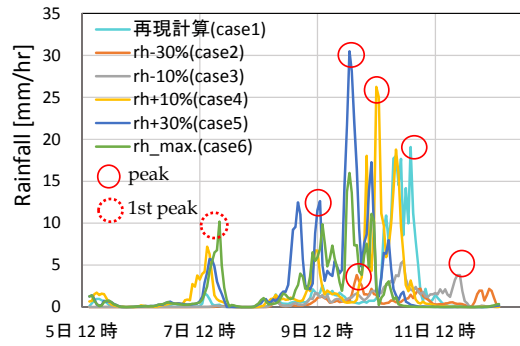


(e) 豪雨 4 (台風+前線)

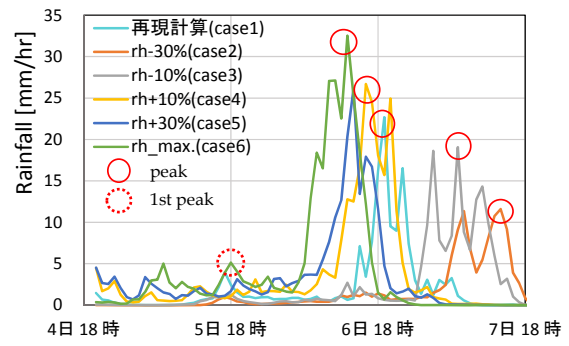


(f) 豪雨 5 (前線)

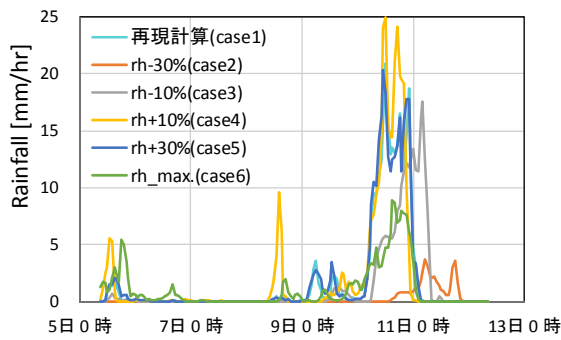
図 4.20 相対湿度の変化が降雨成因毎の時間分布に与える影響 (烏・神流川流域)



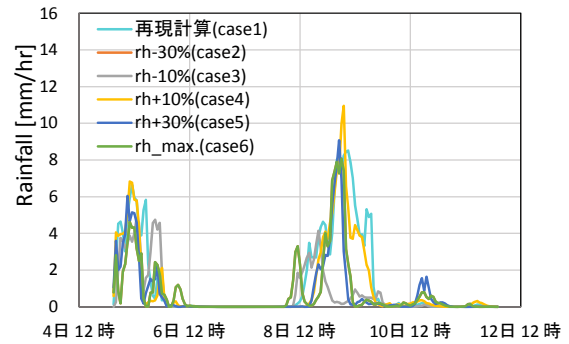
(a) 豪雨 1 (台風)



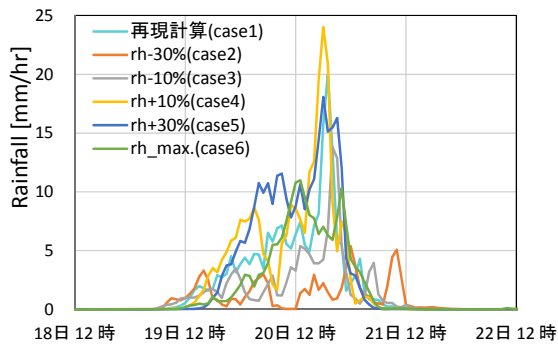
(b) 豪雨 6 (台風)



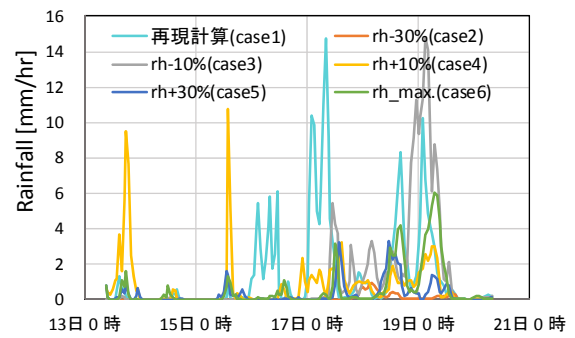
(c) 豪雨 2 (台風+前線)



(d) 豪雨 3 (台風+前線)

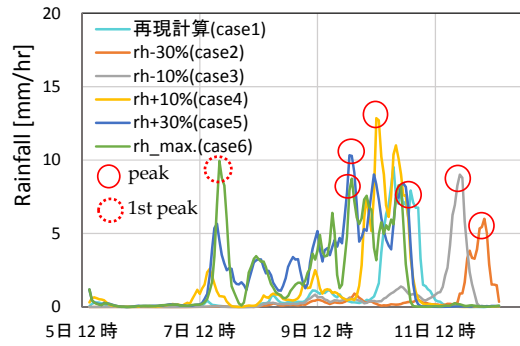


(e) 豪雨 4 (台風+前線)

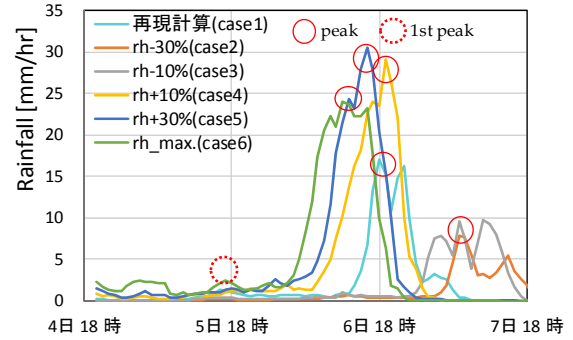


(f) 豪雨 5 (前線)

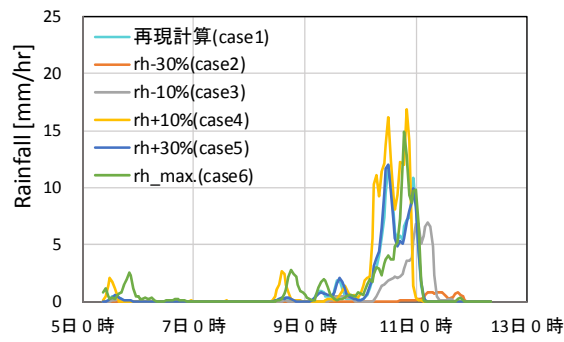
図 4. 21 相対湿度の変化が降雨成因毎の時間分布に与える影響 (吾妻川流域)



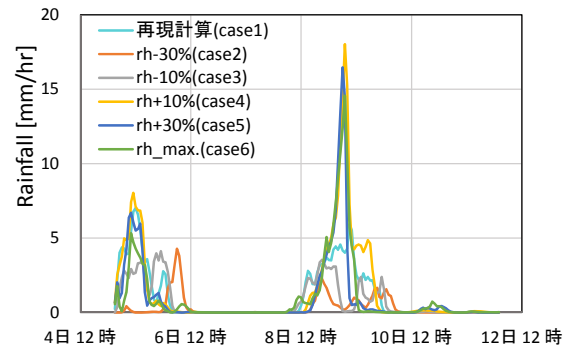
(a) 豪雨 1 (台風)



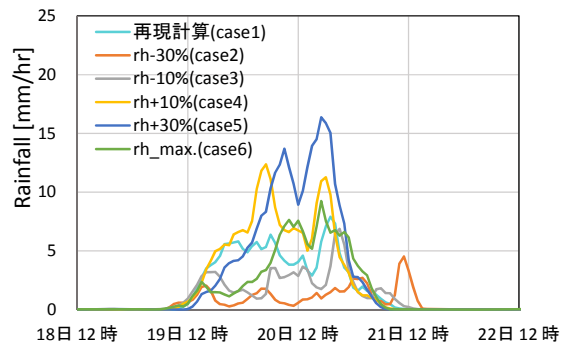
(b) 豪雨 6 (台風)



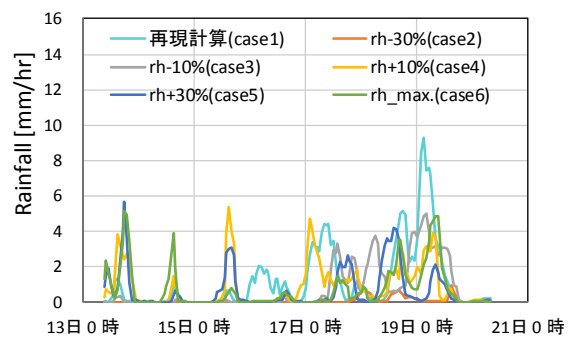
(c) 豪雨 2 (台風+前線)



(d) 豪雨 3 (台風+前線)



(e) 豪雨 4 (台風+前線)



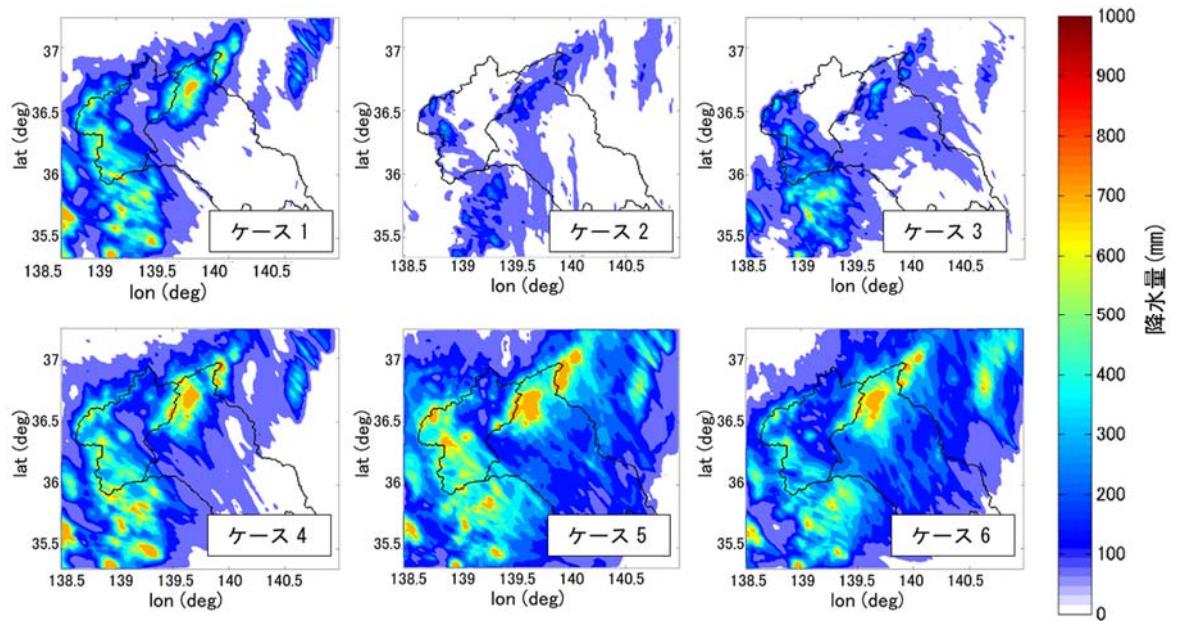
(f) 豪雨 5 (前線)

図 4.22 相対湿度の変化が降雨成因毎の時間分布に与える影響 (オリ根流域)

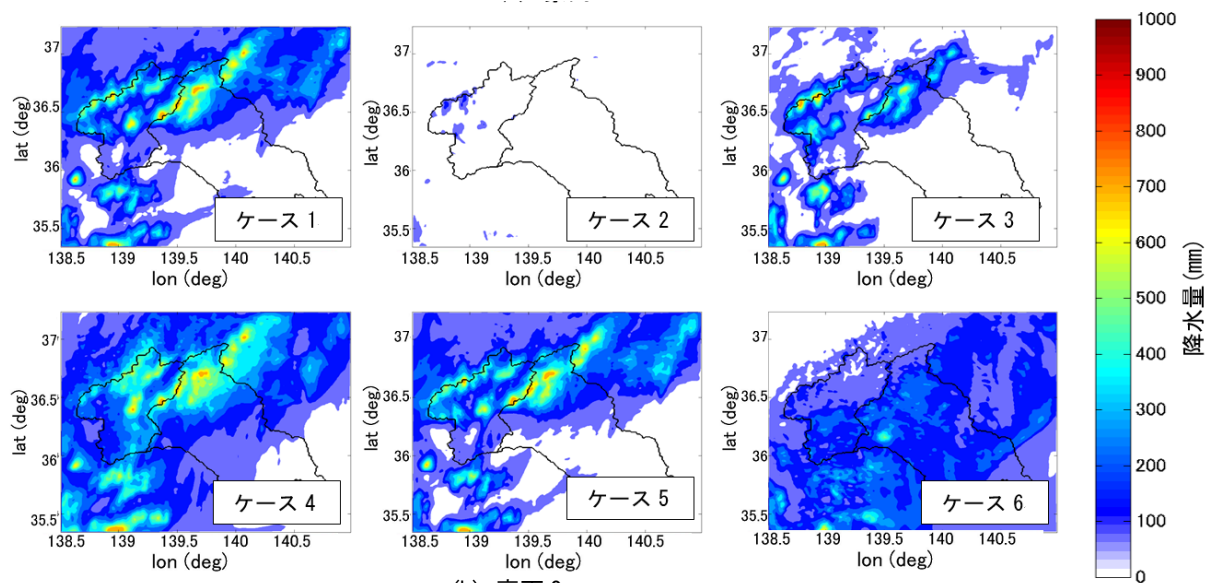
4.5.3 地域分布に与える影響

(1) 台風性豪雨の場合

台風性豪雨である豪雨 1.6, および前線を伴う台風性豪雨 2,3,4 について, 相対湿度を変化させた 72 時間雨量の地域分布の変化を図 4.23(1)~(3)に示す. 台風性豪雨は, 相対湿度を変化させた場合は降雨の地域分布に大きな変化はなく, その結果, 相対湿度の増加に対応した最大 72 時間雨量の変化が見られる. たとえば, 八斗島上流域の実績 72 時間雨量が最も大きくなっている豪雨 6 では, 烏・神流川流域, 奥利根流域に隣接する流域外東側などほぼ同じ位置で降水量に増減がある. このため, 図 4.17(f)に示したように, 相対湿度を 30%増減したケース 5 と 2 を比較した場合, 八斗島上流域の 72 時間雨量は 256mm と 108mm であり, 相対湿度の 60%の変化により 150mm 程度の降雨の相違が表れている.

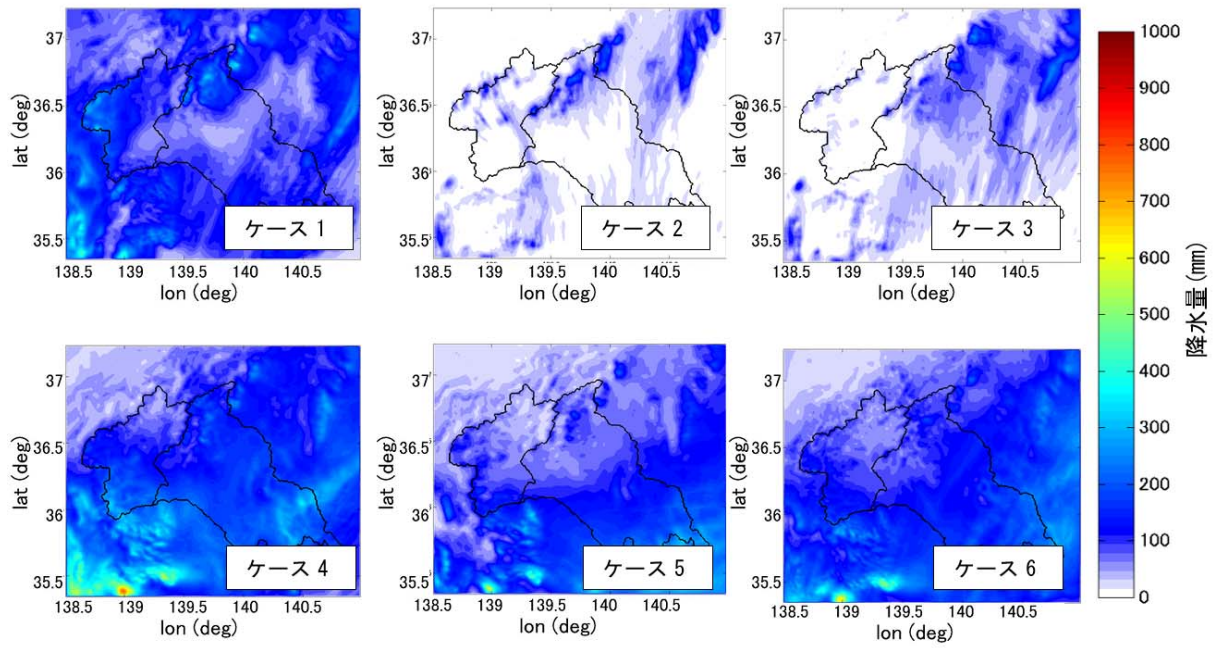


(a) 豪雨 1

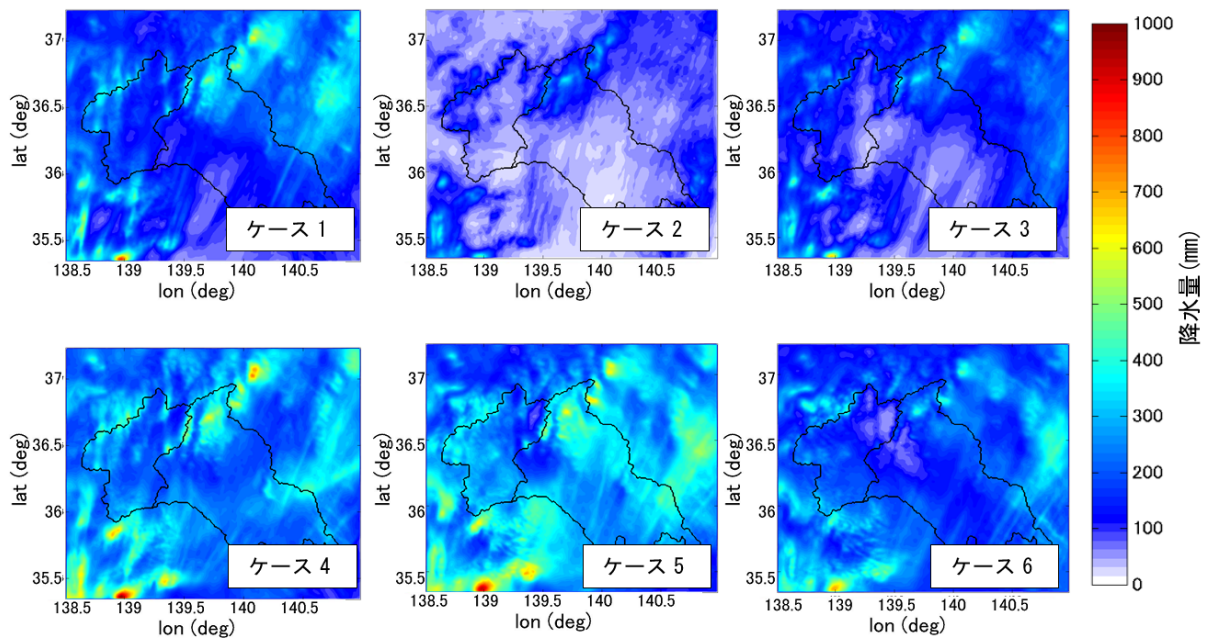


(b) 豪雨 2

図 4.23(1) 72 時間雨量の平面分布の変化 (相対湿度変化) 豪雨 1, 2

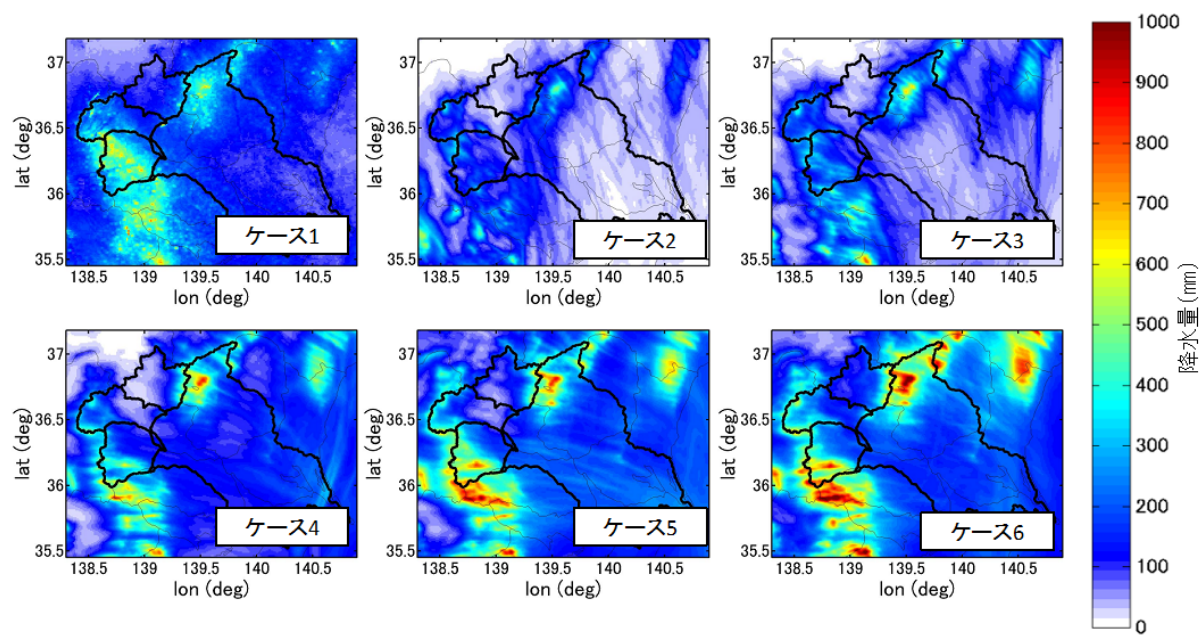


(c) 豪雨 3



(d) 豪雨 4

図 4.23(2) 72 時間雨量の平面分布の変化 (相対湿度変化) 豪雨 3, 4



(e) 豪雨 6

図 4.23(3) 72 時間雨量の平面分布の変化 (相対湿度変化) 豪雨 6

(2) 前線性豪雨の場合

台風性豪雨に関しては相対湿度の変化により平面分布の変化は見られなかったが、前線性豪雨(豪雨5)に関しては、図 4.24 および図 4.25 に示すように相対湿度の変化に対して平面分布が変化する結果となった。これは相対湿度の変化に伴い前線位置が南北方向に変化するためである。このように、前線性豪雨に関しては相対湿度の増加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図 4.17(e) のように減少する結果となっている。

前線性豪雨である豪雨5は、南からの風の北端境界上で豪雨がもたらされていることが第2領域における雨量分布の変化を表す図 4.26 からわかる。図 4.27 を見ると湿度を変更したすべてのケースで地上の南からの風が日本列島にぶつかる場所で相当温位の高い南風が北からの相当温位の低い空気塊に乗り上げるという現象が起きている。また、地上から上空まで高い相当温位となっている位置で強い鉛直風速が発生し、強い降水が生じていることも分かる。これは、相当温位が高い空気塊が地形の影響で持ち上げられ鉛直風速が発生し、このときに地上の空気が持つ水蒸気が雨へと変換されたためであると考えられる。また、図 4.27 のケース2、ケース5を除いて、水平風速は鉛直断面図に矢印で示したように風が吹いていることが分かる。また、その位置は相当温位の低い前線面の位置であることも分かる。さらに、この位置は、湿度を増加させると南に移動し、湿度を低下させると北に移動することが分かる。

続いて、図 4.28 を見ると、どの時間でも 600hPa 面の相当温位の高い場と低い場の境界の南側で降水が発生していることが分かる。また、相当温位の高い場所は再現計算では、北緯 34 度線から北緯 38 度線までの範囲であるのに対し、ケース4、ケース5、ケース6では領域南端から北緯 37 度線の広範囲に渡り、ケース3、ケース2では北緯 35 度線から北緯 37 度線の範囲となっている。よって、湿度を低下させるケースと比べ、湿度を増加させたケースは広範囲に渡って相当温位の高い空気塊が広がっていることが分かる。

以上のことから、湿度を高くすれば領域全域での相当温位が高くなる。その中でも、北側では気温が低いことから、南側に比べて相当温位の上昇が小さくなる。よって、南側から流れてきた暖かく湿った空気の方が北側の空気塊と比べ、より相当温位が高くなることが分かる。また、相当温位の高い場所では上昇流が発生しやすい。つまり、南から流れてくる空気はすぐに持ち上げられ、その大気を持つ水蒸気が降水に変換されることによって、再現計算と比べ、南側で降水が発生していると考えられる。逆に、湿度を低下させた場合は、領域で全体的に相当温位が低下し、より北へ高い相当温位が移動することが分かった。よって、湿度を低下させると降水域が北に移動することため地域分布が変化することが分かった。

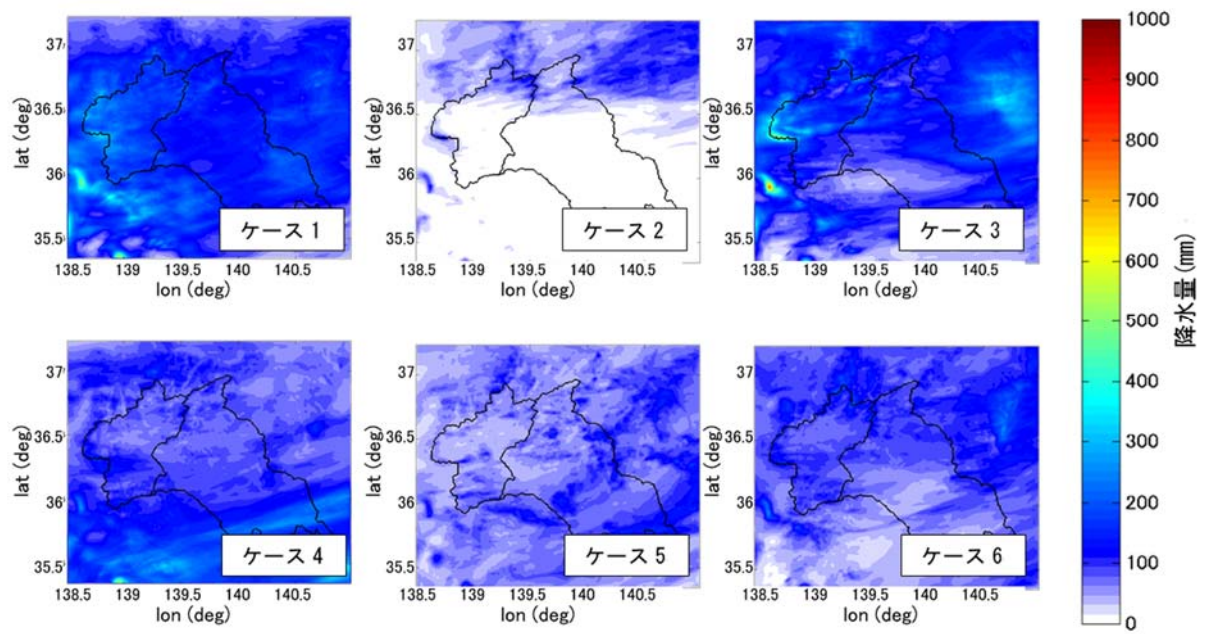


図 4.24 72 時間雨量の平面分布の変化（相対湿度変化）豪雨 5

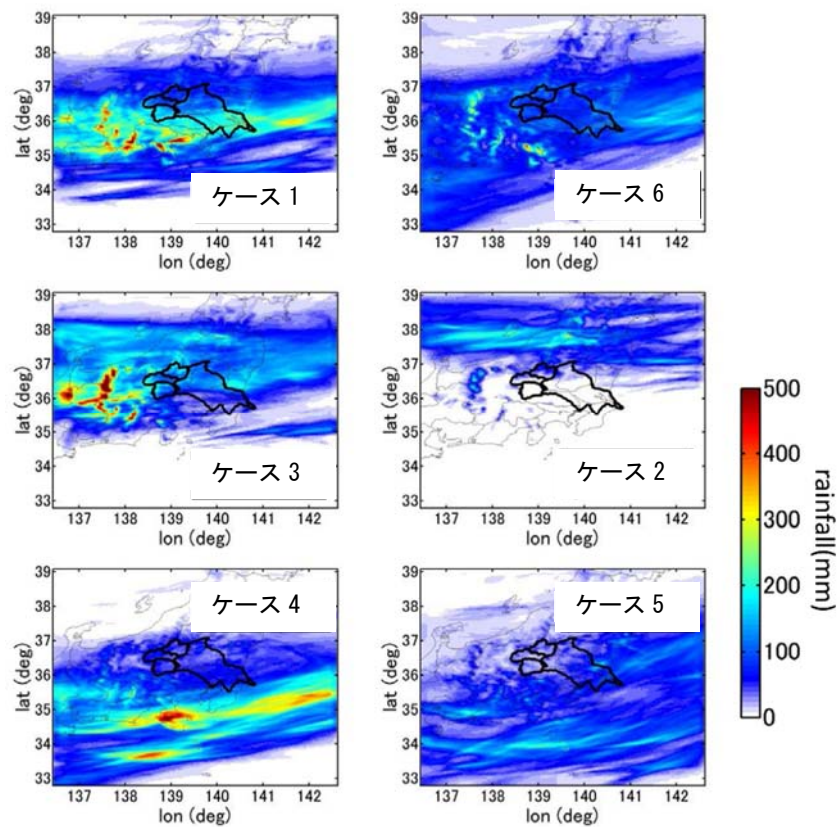


図 4.25 豪雨 5 の第 2 領域の大気場変更ケースごとの 72 時間降水量の平面分布

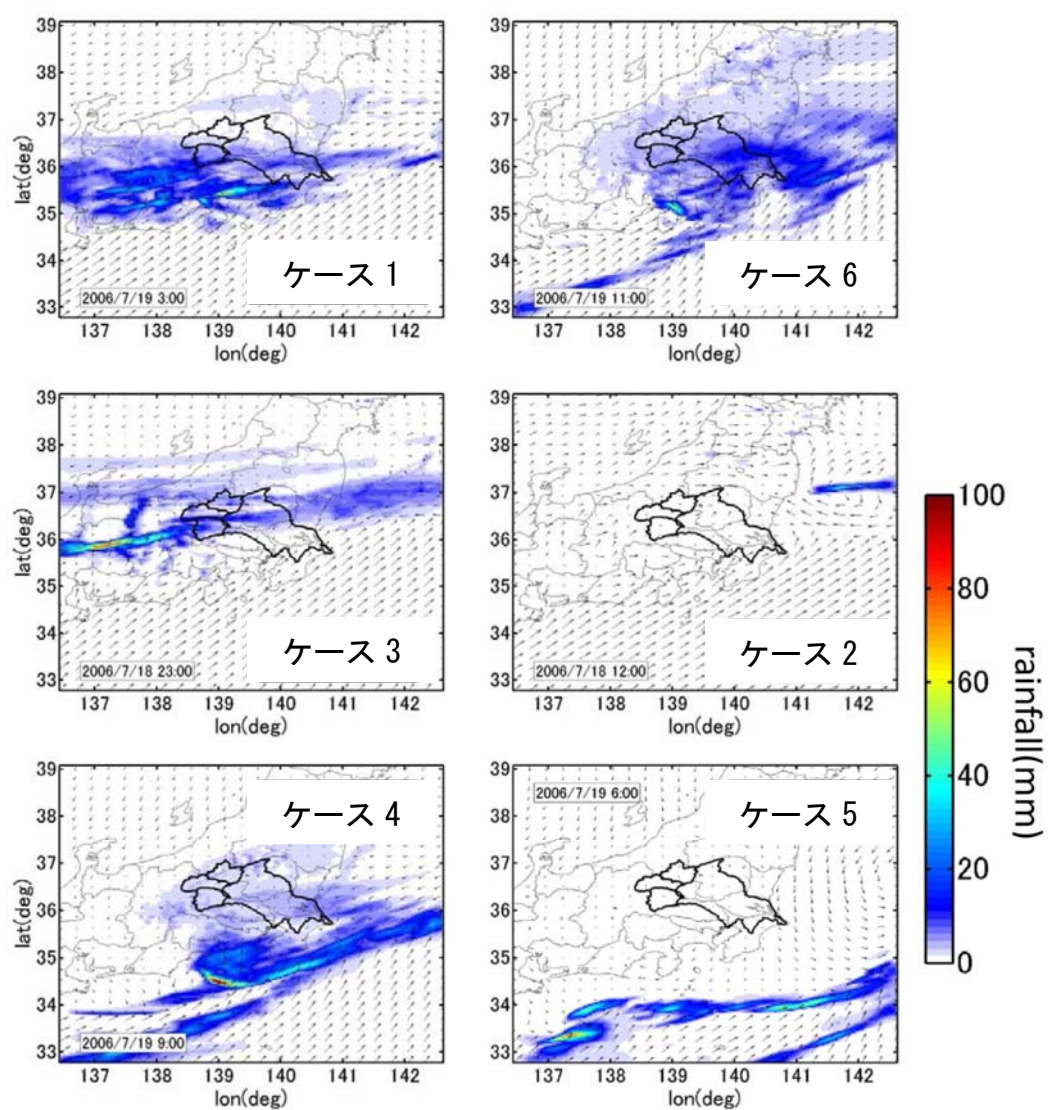


図 4.26 豪雨 5 の相対湿度変化ケースごとの時間最大降水量と地上風速の平面分布

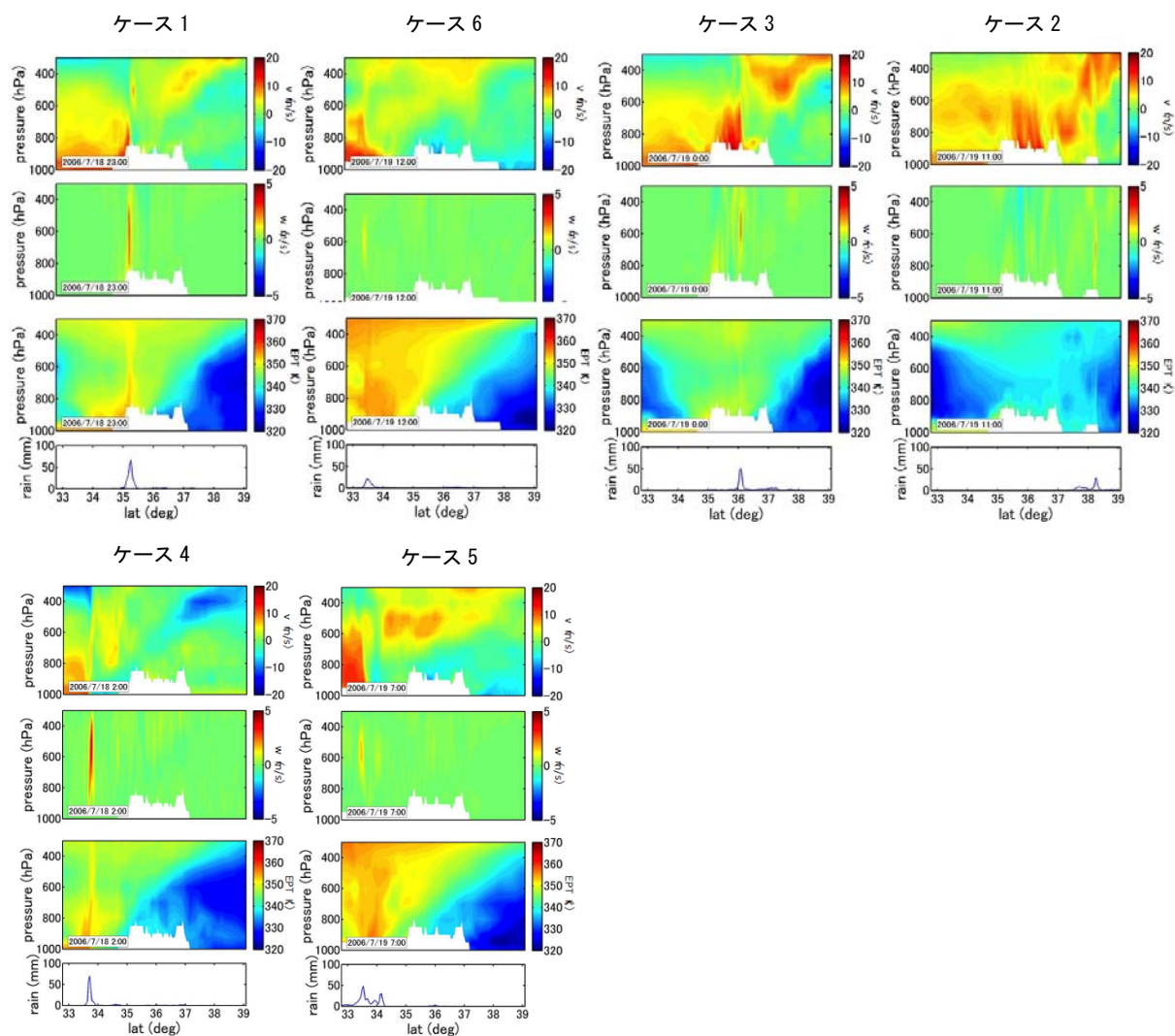


図 4.27 豪雨 5 の東経 138.0 度線最大時間降水量発生時の水平風速，鉛直風速，相当温位の鉛直分布と降水量

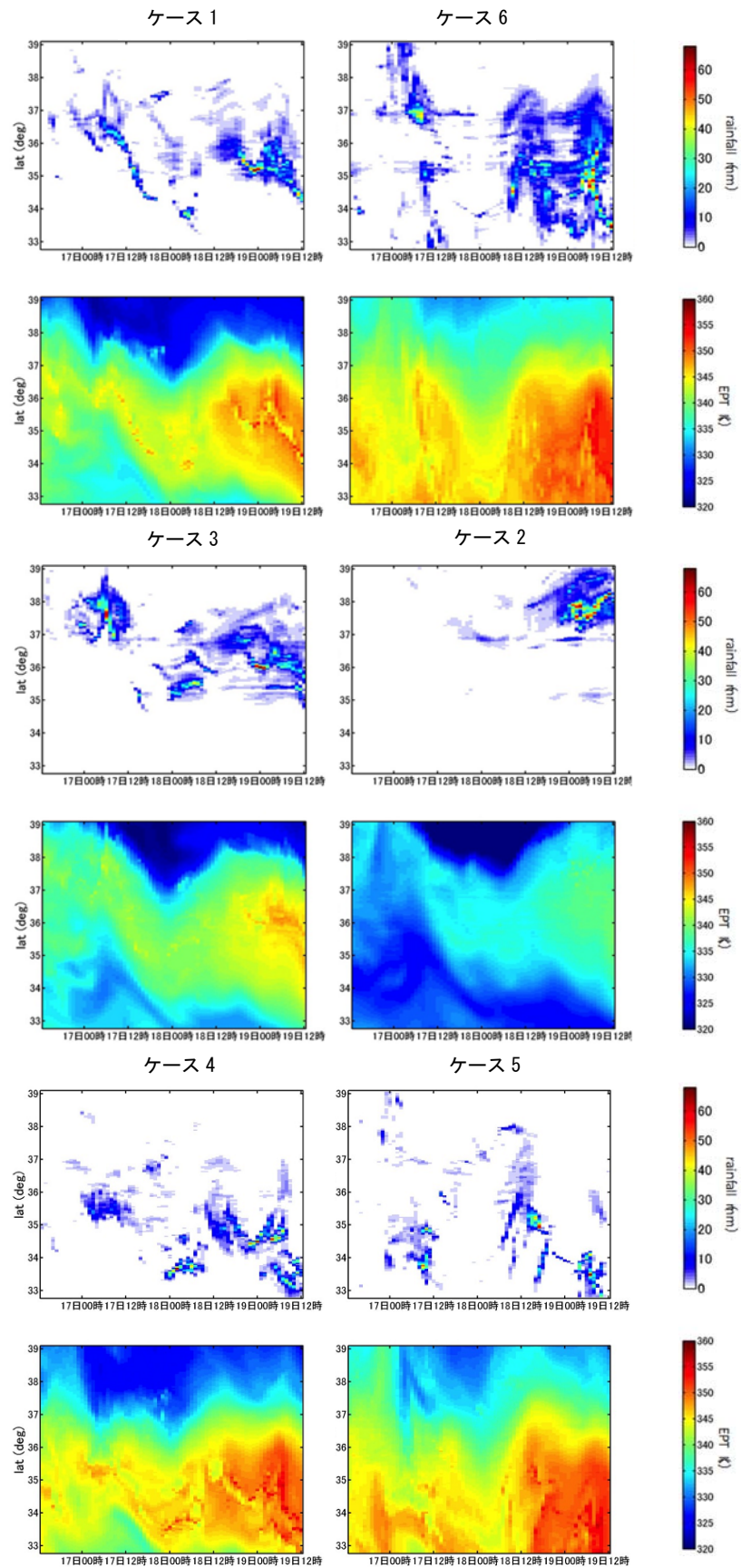


図 4.28 豪雨 5 の第 2 領域の東経 138.0 度線の降水量と 600hPa 面の相当温位の時間変化

4.6 雨量と水蒸気フラックスの関係

4.6.1 八斗島上流域

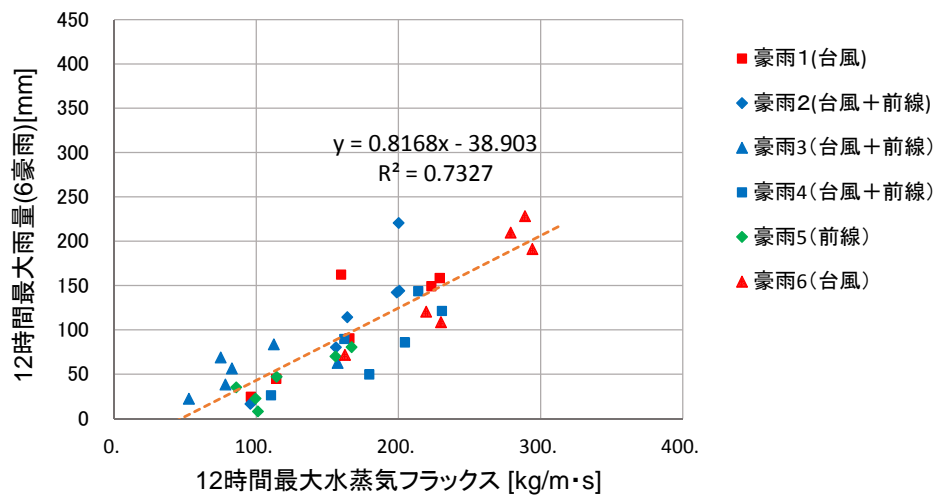
八斗島上流域における 12, 24, 72 時間最大雨量に対して最も相関が高くなった水蒸気フラックスの気圧面と継続時間を表 4.3 に示す. どの組合せにおいても概ね相関係数 0.8 以上の高い相関が得られた. また, 6 豪雨全てを対象とした場合は, 500hPa の 12~24 時間との相関が高いことがわかる. なお, ここでは気圧面毎の水蒸気フラックスを用いて雨量との相関関係を検討している.

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³⁾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. 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.

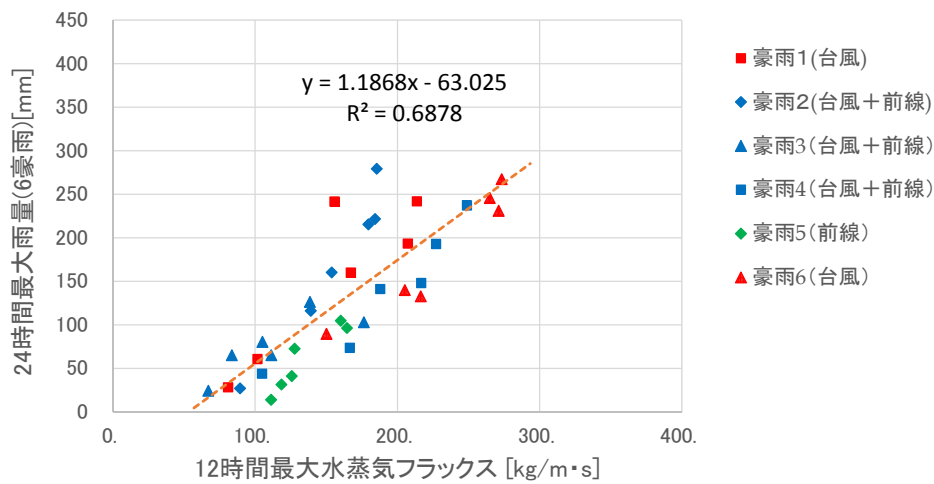
ここで, 12 時間, 24 時間, および 72 時間雨量について, 表 4.3 に示した 6 豪雨全体を対象とした最も相関の高い水蒸気フラックスとの関係を図 4.29 に示す. 図中には, 6 豪雨の相対湿度を変化させた 6 ケースの WRF を用いた 36 個 (6 豪雨×6 ケース) の計算結果とともに相関式を示している. 36 個の計算結果の 72 時間雨量最大値は 386mm となっており, 八斗島上流域における過去最大値であるカスリン台風時(1947)の 3 日雨量である 318mm を上回る雨量が発生している.

表 4.3 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 (八斗流域)

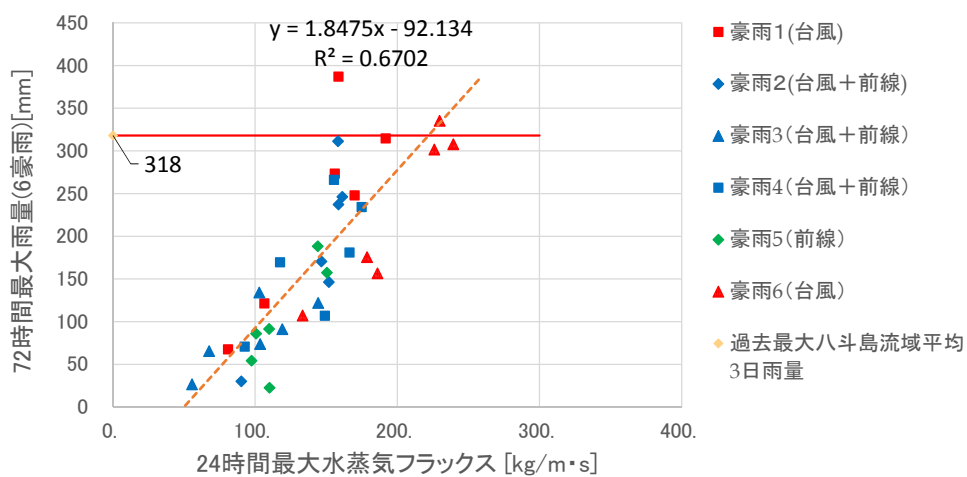
対象豪雨	最大 12 時間降雨量			最大 24 時間降雨量			最大 72 時間降雨量		
	相関係数	気圧面	継続時間	相関係数	気圧面	継続時間	相関係数	気圧面	継続時間
6 豪雨	0.856	550hPa	12hr	0.829	500hPa	12hr	0.819	550hPa	24hr
台風性:豪雨.1.,6	0.967	800hPa	24hr	0.944	850hPa	36hr	0.844	850hPa	36hr
台風+前線: 豪雨.2,3,4	0.793	750hPa	36hr	0.824	550hPa	12hr	0.881	550hPa	12hr
前線性:豪雨 5	0.975	600hPa	48hr	0.959	500hPa	3hr	0.985	500hPa	24hr



(a) 12 時間雨量



(b) 24 時間雨量



(c) 72 時間雨量

図 4. 29 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

4.6.2 烏・神流川流域，吾妻川流域，および奥利根流域

次に，八斗島流域内の小流域である烏・神流川流域，吾妻川流域，および奥利根流域における12時間，24時間，および72時間雨量について，表4.4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4.30～図4.32に示す．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．

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，小流域における短時間降雨に対しては，台風の地形性降雨の影響が大きいものと考えられる．なお，前線を伴わない台風性降雨では850hPa付近だけでなく250～200hPaにおける相関が高いことがわかる．しかしながら，250～200hPaにおける水蒸気フラックスの値は850hPa～700hPaにおける水蒸気フラックスに対して1オーダー小さく台風時の地形性降雨に直接影響を与えている指標ではないと考えられるため，850hPa付近の関係式を用いるものとした．

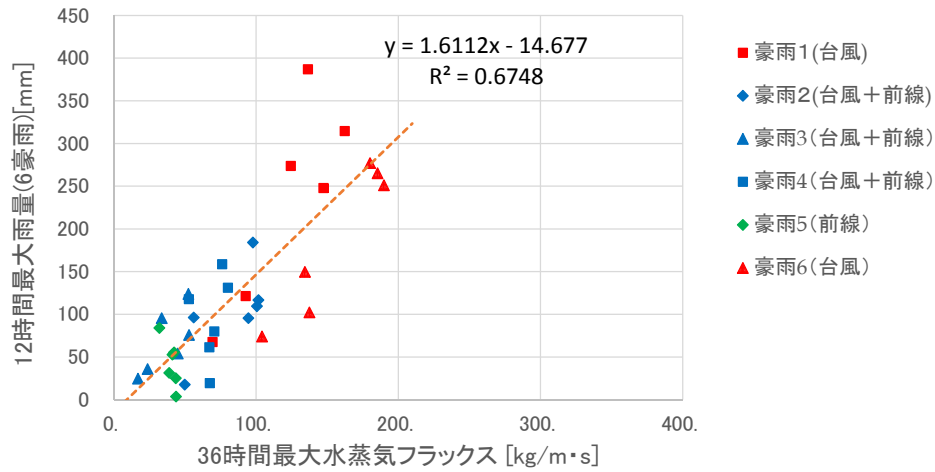
図4.30～図4.32に示した水蒸気フラックスと降雨量の相関式の傾きを表4.5示す．八斗島流域を対象とした関係式では降雨継続時間が大きいほど傾きが大きくなっている．すなわち，指標の変化に対する降雨量の変化の物理的な関係が降雨継続時間毎に異なることが分かる．これに対して，吾妻川流域および奥利根流域では12時間雨量に対する相関式の傾きが最も大きく2.0以上となっている．また，烏・神流川流域においても12時間雨量に対する相関式の傾きは24時間雨量に対する傾きより大きくなっている．これは，降雨量と最も相関の高い気圧面が750hPa～800hPaにおけるものであり，台風性の水蒸気フラックスの影響により地形性降雨の雨量増分が大きくなっているためであると考えられる．

表 4.4 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層と継続時間（烏・神流川流域，吾妻川流域，奥利根流域含む）

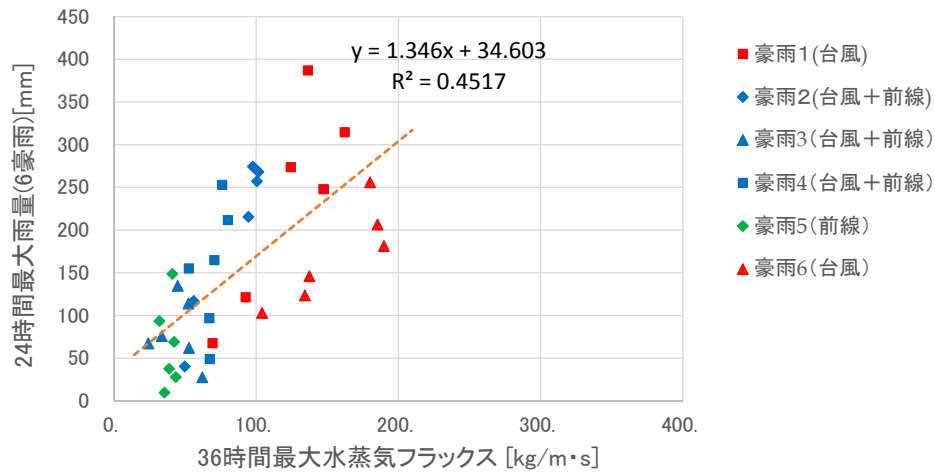
対象豪雨	流域	最大12時間降雨量			最大24時間降雨量			最大72時間降雨量		
		相関係数	気圧面	継続時間	相関係数	気圧面	継続時間	相関係数	気圧面	継続時間
6豪雨	八斗島	0.856	550hPa	12hr	0.829	500hPa	12hr	0.819	550hPa	24hr
	烏・神流川	0.822	750hPa	36hr	0.879	750hPa	36hr	0.840	500hPa	24hr
	吾妻川	0.874	800hPa	48hr	0.771	550hPa	12hr	0.766	550hPa	24hr
	奥利根	0.861	800hPa	36hr	0.871	750hPa	36hr	0.789	550hPa	24hr
台風性：豪雨1,6	八斗島	0.967	800hPa	24hr	0.944	850hPa	36hr	0.844	850hPa	36hr
	烏・神流川	0.951 (0.728)	200hPa (850hPa)	60hr (36hr)	0.938 (0.742)	200hPa (850hPa)	48hr (36hr)	0.927	850hPa	36hr
	吾妻川	0.889 (0.529)	200hPa (850hPa)	60hr (48hr)	0.922 (0.604)	200hPa (850hPa)	60hr (48hr)	0.95 (0.761)	250hPa (850hPa)	60hr (36hr)
	奥利根	0.923 (0.679)	200hPa (850hPa)	60hr (48hr)	0.938 (0.742)	200hPa (850hPa)	60hr (48hr)	0.953 (0.816)	200hPa (850hPa)	48hr (36hr)
台風+前線：豪雨2,3,4	八斗島	0.793	750hPa	36hr	0.824	550hPa	12hr	0.881	550hPa	12hr
	烏・神流川	0.777	450hPa	6hr	0.853	450hPa	12hr	0.859	450hPa	12hr
	吾妻川	0.824	700hPa	12hr	0.857	550hPa	12hr	0.901	550hPa	12hr
	奥利根	0.794	400hPa	12hr	0.834	450hPa	6hr	0.878	500hPa	12hr
前線性：豪雨5	八斗島	0.975	500hPa	48hr	0.959	500hPa	3hr	0.985	500hPa	24hr
	烏・神流川	0.968	450hPa	24hr	0.934	450hPa	6hr	0.978	450hPa	6hr
	吾妻川	0.985	600hPa	12hr	0.976	650hPa	6hr	0.997	500hPa	3hr
	奥利根	0.894	450hPa	24hr	0.934	450hPa	1hr	0.979	450hPa	6hr

表 4.5 水蒸気フラックスと流域平均雨量の相関式の傾き

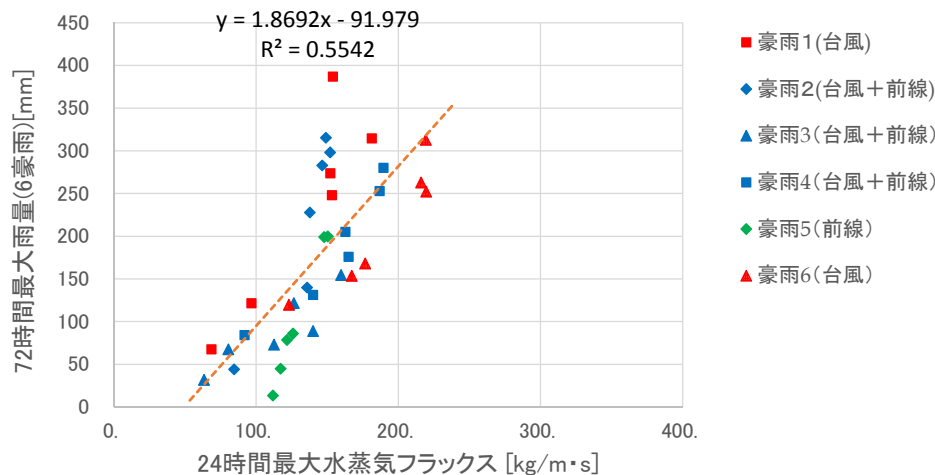
対象豪雨	流域	最大12時間降雨量	最大24時間降雨量	最大72時間降雨量
6豪雨	八斗島	0.82	1.19	1.85
	烏・神流川	1.61	1.35	1.87
	吾妻川	2.39	1.02	1.75
	奥利根	2.03	1.47	1.61



(a) 12 時間雨量

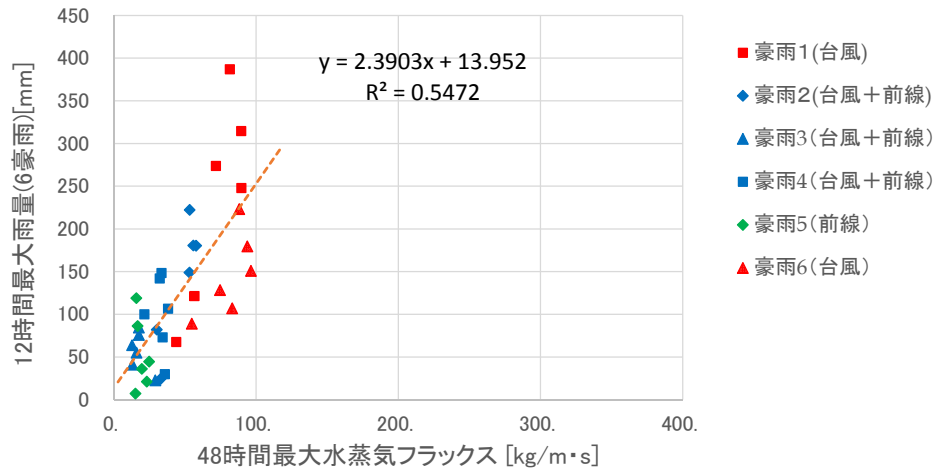


(b) 24 時間雨量

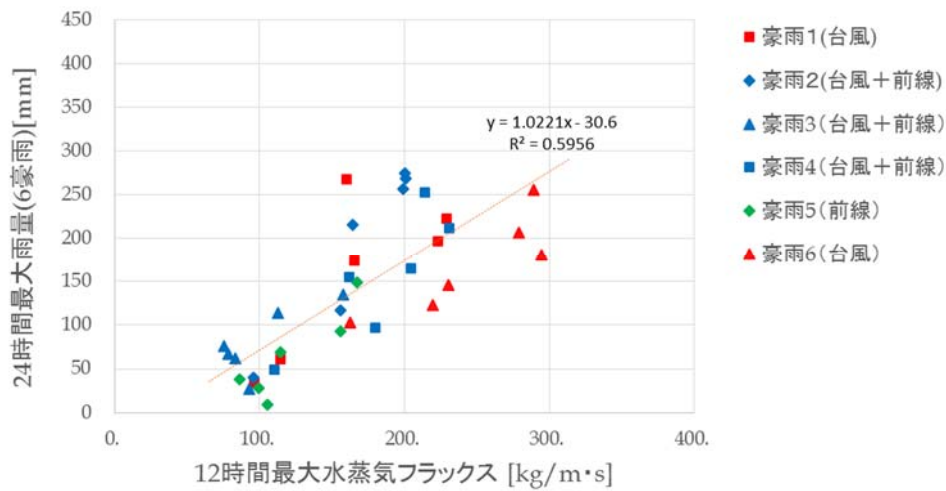


(c) 72 時間雨量

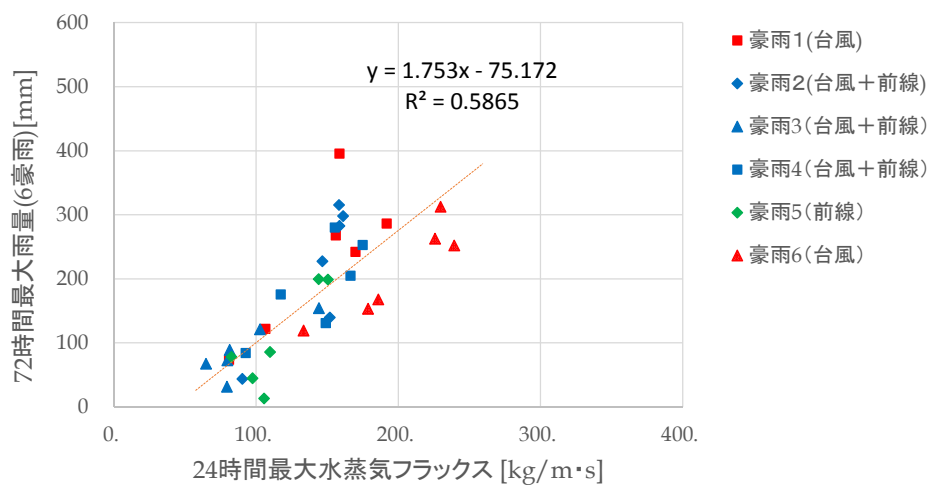
図 4.30 水蒸気フラックスと継続時間毎の烏・神流川流域平均雨量の関係



(a) 12 時間雨量

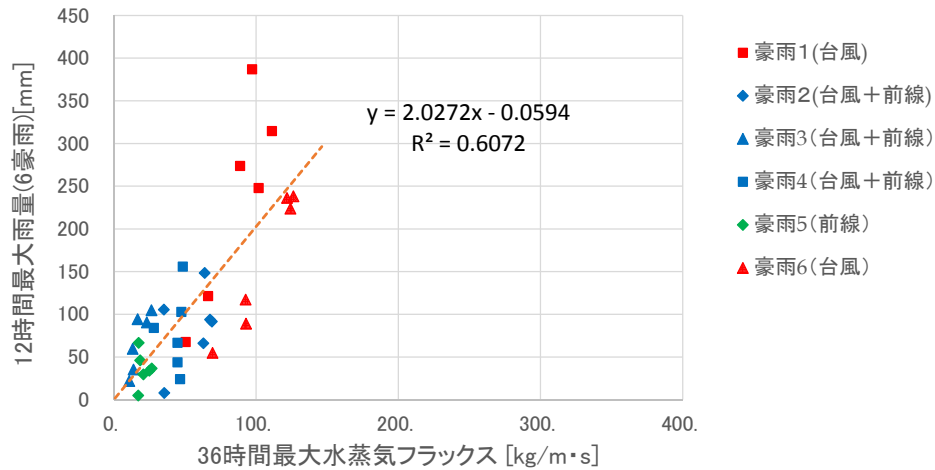


(b) 24 時間雨量

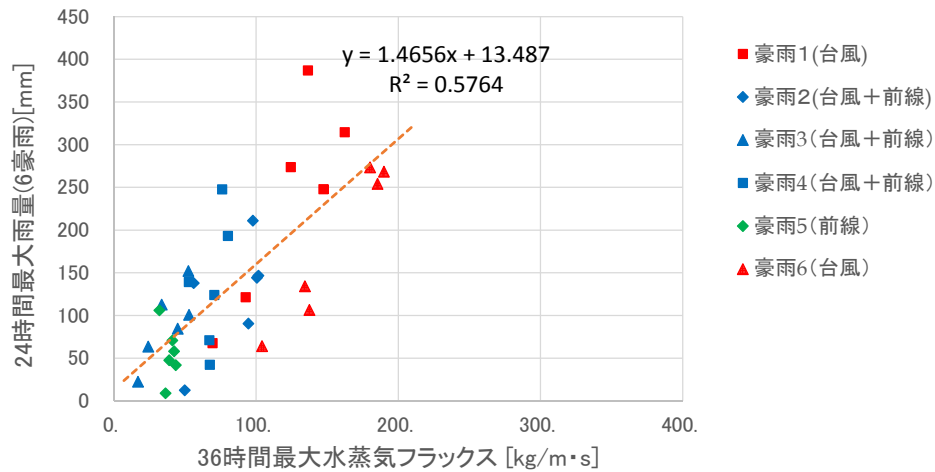


(c) 72 時間雨量

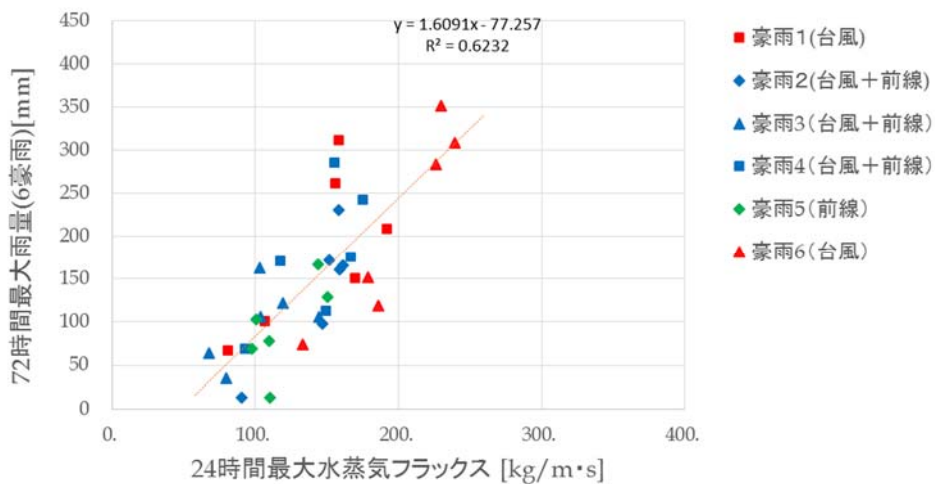
図 4.31 水蒸気フラックスと継続時間毎の吾妻川流域平均雨量の関係



(a) 12 時間雨量



(b) 24 時間雨量



(c) 72 時間雨量

図 4.32 水蒸気フラックスと継続時間毎のオリ根流域平均雨量の関係

4.7 結語

第4章では、降雨量と相関の高い指標の選定を行い、気象モデル WRF を用いて気象条件と降雨量、および時空間分布の変化を把握し、気象要素と降雨量の関係式を降雨継続時間毎、地域毎に作成した。第4章において得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) メソ客観解析データを用いて、八斗島流域平均雨量と、前橋地点における可降水量、および水蒸気フラックスの相関を比較したところ、水蒸気フラックスの相関が各継続時間において高く、降雨量を評価する適切な指標であることがわかった。
- (2) WRF を用いた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、河川計画上は重要な影響であると考えられる。この点については、第6章における可能最大洪水(PMF)の推定において検証する。
- (3) 八斗島上流域流域平均雨量は降雨継続時間 12, 24, 72 時間雨量について 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。小流域についても水蒸気フラックスと雨量の相関は高く、水蒸気フラックスは降雨継続時間毎、および地域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。
- (4) 水蒸気フラックスの降雨量の相関式の傾きは、たとえば、八斗島流域においては 12, 24, 72 時間雨量に対して 0.82, 1.19, 1.85 と降雨継続時間毎に異なることがわかった。このように、従来の指標の変化率を降雨量の変化率としている手法に対して、降雨継続時間と地域に応じた指標と降雨量の物理的な関係を把握することにより降雨量を推定する手法を示した。

以上の検討から得られた水蒸気フラックスと降雨量の降雨継続時間毎、および小流域ごとの関係式を用いて第5章において PMP と時空間分布の推定を行う。

第 4 章の参考文献

- 1) World Meteorological Organization : Manual on Estimation of Probable Maximum Precipitation(PMP) WMO-No.1045, 2009.
- 2) W.C.D.K.Fernando & S.S.Wickramasuriya : The hydro- meteorological estimation of probable maximum precipitation under varying scenarios in Sri Lanka, *International Journal of Climatology*, 31, pp.668-676, 2011.
- 3) 吉崎正憲・加藤輝之：豪雨・豪雪の気象学，朝倉書店，pp.72-76, 2007.

第5章 可能最大降水量(PMP)と時空間分布の推定

5.1 概説

第5章では、第4章において作成した水蒸気フラックスと降雨量の継続時間毎、地域毎の関係式を用いて、PMPとその時空間分布の推定を行う。PMPは、指標が最大となる値を与え、そのパラメータと降水量の関係式を用いて推定する。そのため、検討対象6豪雨だけでなく、観測データの得られる範囲で最大値を推定する。降雨と相関の高い指標として関係式に用いている水蒸気フラックスは500hPa気圧面など高層の値であり、データの得られる期間が限られているため、地上観測値から指定気圧面の値を推定し、できるだけ長期のデータから最大値を得られるようにする。さらに、今後の気候変動の影響も考慮したPMPの推定を行うため、気候変動予測値から最大となる指標、雨量の抽出を行い推定する。なお、時間分布の推定においては台風性豪雨にみられた相対湿度の増加に対する時系列の変化も踏まえて検討を行う。

5.2 PMPの推定手法

5.2.1 現況でのPMPの推定手法

第4章で作成された相関式を用いて、前橋気象官署においてデータの得られる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を整理する。ただし、1961年～2013の期間は気象庁HPにおける過去のデータ検索(<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>)から水蒸気フラックスの算定に必要な気象要素の通年の時間データを得ることができるが、1901年～1960年の60年間は2014年時点で電子化されておらず、前橋地方気象台において紙資料台帳をにおいて閲覧によって把握する必要があった。このため、利根川流域において100mm/3日以上の雨量となっている期間についてデータを前橋地方気象台において複写して収集し整理した。

また、地上観測からの過去最大の推定値を、降雨とを相関の高い気圧面での値へ変換を行うための地上と上層気圧面の関係式は、2013年に公開されたJRA55再解析データを用い、利根川における主要豪雨を対象として作成する。作成した関係式から地上観測値の過去最大値を降雨と相関の高い気圧面相当の値に変換し、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。

5.2.2 気候変動を考慮したPMPの推定手法

温暖化の影響を考慮した最大値の推定は以下の方法による。1つの方法は、前橋地点に相当する位置の時間解像度を有す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。算定された水蒸気フラックスを第4章で作成した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の最大値も考慮して最大値を設定する。

ここで、検討に用いる気候変動予測値は2014年6月に予測値が公開された「環境省 気候変動モデル予測データ」の出力値を以下の理由から用いることとした。

(1) データの時間解像度

本データの raw データには YYMMDD_plev.dat (ISTR_PB: P (気圧) 面ファイル) において高層気圧面の時間解像度を有するデータが公開されているため、第4章において降雨と関連の高い指標とした12時間最大値などに対応したデータを得ることができる。(たとえば、地球温暖化第8巻データは高層のデータは日単位の解像度となっている。)

(2) データの排出シナリオ

データは、RCP8.5～RCP2.6までの排出シナリオに基づくデータが公開されている。これまでの気象庁 AGCM3.1S, 3.2Sなどの気候モデルが、A1Bシナリオであったのに対して、2100年以降も放射強制力の上昇が続く「高位参照シナリオ」RCP8.5シナリオにもとづく出力値を用いることができる。このため、温暖化の影響が最大と考えられるシナリオの検討を行うことができるため、PMPの検討に適切であると考えられる。

(3) 不確実性の考慮

RCP8.5シナリオにおいて出力されている積雲対流スキーム3ケース、海面水温3ケースの違いにより表5.1に示す9ケースの将来ケースを対象とすることにより、不確実性の評価を行うことができる。

表 5.1 気候モデル検討ケース

番号	計算期間	シナリオ	海面水温	積雲対流スキーム	ケース名
1	現在気候 3ケース	-	HadISST	YS	HPA_m02
2			HadISST	KF	HPA_kf_m02
3			HadISST	AS	HPA_as_m02
4	将来気候 18ケース	RCP8.5 9ケース	SST1	YS	HFA_rcp85_c1
5			SST1	KF	HFA_kf_rcp85_c1
6			SST1	AS	HFA_as_rcp85_c1
7			SST2	YS	HFA_rcp85_c2
8			SST2	KF	HFA_kf_rcp85_c2
9			SST2	AS	HFA_as_rcp85_c2
10			SST3	YS	HFA_rcp85_c3
11			SST3	KF	HFA_kf_rcp85_c3
12			SST3	AS	HFA_as_rcp85_c3
13	将来気候 18ケース	RCP6.0 3ケース	SST1	YS	HFA_rcp60_c1
14			SST2	YS	HFA_rcp60_c2
15			SST3	YS	HFA_rcp60_c3
16		RCP4.5 3ケース	SST1	YS	HFA_rcp45_c1
20			SST2	YS	HFA_rcp45_c2
21			SST3	YS	HFA_rcp45_c3
17		RCP2.6 3ケース	SST1	YS	HFA_rcp26_c1
18			SST2	YS	HFA_rcp26_c2
19			SST3	YS	HFA_rcp26_c3

なお，雨量データに関してはアメダス地点においてバイアス補正が行われている `biascorrected` データを合わせて収集し流域平均3日雨量の作成から雨量上位となる期間を抽出し，気候変動の影響による最大雨量の推定と `raw` データを用いた水蒸気フラックス抽出の対象期間を設定した．

5.3 PMP の時空間分布の推定手法

5.3.1 時間分布の推定手法

(1) 降雨継続時間毎の組み合わせの設定方法

図 5.1 に示すように降雨継続時間毎の最大値の設定を行う．降雨継続時間が 12, 24, 72 時間それぞれ最大の水蒸気フラックスに対応する雨量として PMP を設定する．ただし，最大水蒸気フラックスが発生しているのは同じ降雨現象に対してではない可能性があるが，可能最大降水量を推定するという観点から最大となる組み合わせとして設定する．

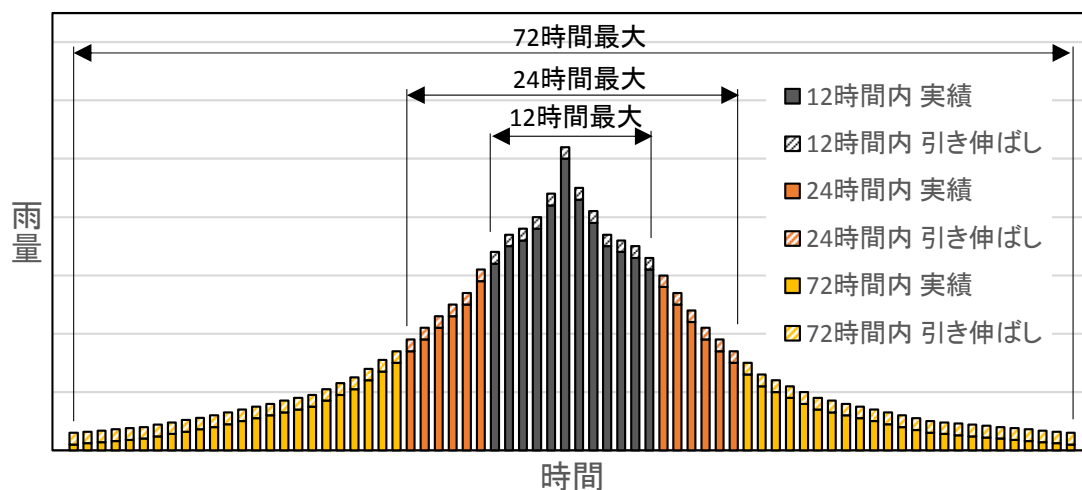


図 5.1 各継続時間毎の最大水蒸気フラックスで引き伸ばす時間分布設定方法

(2) 降雨成因ごとの時間分布の設定方法

1) 「台風+前線」および「前線」

図 4.19(c)～(f)に示したように、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。

2) 「前線を伴わない台風」

図 4.19(a), (b)に示したように、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。最大水蒸気フラックス時はさらにピーク発生時間などが変化する可能性もあるが最大値に最も近いと考えられる相対湿度 100%の波形に対して雨量を変化させる。

5.3.2 地域分布の推定手法

八斗島上流の地域を烏・神流川流域、吾妻川流域、奥利根流域の3流域に分割して検討する。

3 小流域ごとに作成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。ただし降雨継続時間毎に雨量が逆転しないよう整合を図る必要があり、この点については5.6において検討したうえでPMPを設定する。なお、小流域における降雨成因ごとの時間分布特性は八斗島流域における時間分布特性と同様であることを第4章において確認しているため八斗島上流流域と同様に豪雨1, および豪雨6に関しては相対湿度 100%に対する波形に対して引き伸ばす。

5.4 過去最大水蒸気フラックスの評価

5.4.1 降雨と相関の高い気圧面と地上観測値の関係把握に用いる主要豪雨

検討には利根川流域の主要洪水を河川整備基本方針^りから表 5.2 に示した主要洪水を対象とする。JRA55 再解析データは 1958 年(昭和 33 年)以降の期間において出力値が得られているため、1958 年(昭和 33 年)以降の洪水について、降雨と相関の高い気圧面における JRA55 再解析データを用いて検討を行う。

表 5.2 既往洪水の概要

洪水発生年	流域平均 3日雨量 (八斗島上流域)	流量 (八斗島)	被害状況
明治18年7月(台風)		〈3,700〉	浸水面積 2,800ha
明治23年8月(台風)		〈3,780〉	
明治27年8月(台風)		〈3,710〉	浸水面積 27,600ha
明治29年9月(台風)		〈3,870〉	浸水面積 81,700ha
明治40年8月(台風)			浸水面積 78,000ha
明治43年8月(台風)		(6,960)	全潰家屋 2,121棟、流失家屋 2,796棟 床上浸水 15,579戸、床下浸水 11,575戸 ※群馬県下の合計値
昭和10年9月(前線)		9,030	浸水家屋戸数 5,638戸、浸水面積 12,600ha ※利根川水系氾濫地点9箇所の合計
昭和13年6・7月(台風)		2,850	浸水面積 214,500ha ※利根川水系全体(中川流域含)の値
昭和16年7月(前線)		8,990	浸水面積 200,000ha ※利根川本川の内外氾濫の推定値
昭和22年9月15日(台風)	318	(17,000)	浸水家屋 303,160戸、家屋流出倒壊 23,736戸 家屋半壊 7,645戸、田畑の浸水 176,789ha ※1都5県の合計値
昭和23年9月16日(台風)	204		床下浸水 1,523戸、床上浸水 829戸 ※利根川本川筋渡良瀬川の合計値
昭和24年9月 1日(台風)	204	10,500	床下浸水 1,792戸、床上浸水 3,969戸 家屋倒壊流出 639戸、家屋半壊 1,044戸 浸水面積 4,284ha ※渡良瀬川、鬼怒川、江戸川の合計値
昭和25年8月 5日(台風)	151	8,640	浸水家屋 3,517戸 ※小貝川破堤による被害
a1 昭和33年9月18日(台風)	168	9,250 ※戻し流量	床上浸水 29,900戸、浸水面積 28,000ha ※中川流域での被害
a2 昭和34年8月14日(台風)	214	8,330 ※戻し流量	各所で護岸水制等の流失
a3 昭和41年6月26日(台風)	162	6,040	床下浸水 33,328棟、半壊床上浸水 6,778棟 全壊流失 2棟、農地 41,505ha 宅地その他 10,739ha
a4 昭和41年9月24日(台風)	130	6,040	床下浸水 5,212棟、半壊床上浸水 2,250棟 全壊流失 161棟、農地 14,988ha 宅地その他 7,119ha
a5 昭和49年9月 1日(台風)	119	5,960 ※戻し流量	床下浸水 2,689棟、半壊床上浸水 97棟 全壊流失 5棟、農地 773ha 宅地その他 475ha
a6 昭和56年8月23日(台風)	221	8,280 ※戻し流量	床下浸水 646棟、半壊床上浸水 269棟 全壊流失 3棟、農地 1,568ha 宅地その他 120ha
a7 昭和57年8月 2日(台風)	221	9,100 ※戻し流量	床下浸水 1,478棟、半壊床上浸水 137棟 全壊流失 4棟、農地 234ha 宅地その他 130ha
a8 昭和57年9月13日(台風)	214	8,400 ※戻し流量	床下浸水 27,649棟、半壊床上浸水 7,242棟 全壊流失 3棟、農地 4,273ha 宅地その他 4,690ha
a9 平成10年9月16日(台風)	186	9,960 ※戻し流量	床下浸水 1,176棟、半壊床上浸水 98棟 全壊流失 2棟、農地 623ha 宅地その他 759ha

※()書きは推定値 〈 〉書きは中田地点の流量

※被害状況については昭和34年洪水までは「利根川百年史」、それ以降は「水害統計(建設省河川局)」の値を用いた。

5.4.2 前橋地点と JRA55 観測地点における補正

降雨量を評価する地点は前橋気象官署地点であるが、JRA55 再解析データは約 60km の空間解像度であるため、図 5.2 に示すように、前橋地点と約 30km 離れた位置(37304)が前橋に最も近い地点である。そのため、検討対象 6 豪雨の現況再現計算結果から、JRA55 再解析データ出力地点と前橋地点における水蒸気フラックスの平均値の比率を図 5.3 に示す関係図を用いて算定し JRA55 再解析値に乗じて補正を行うことにより、前橋地点における水蒸気フラックスとする。

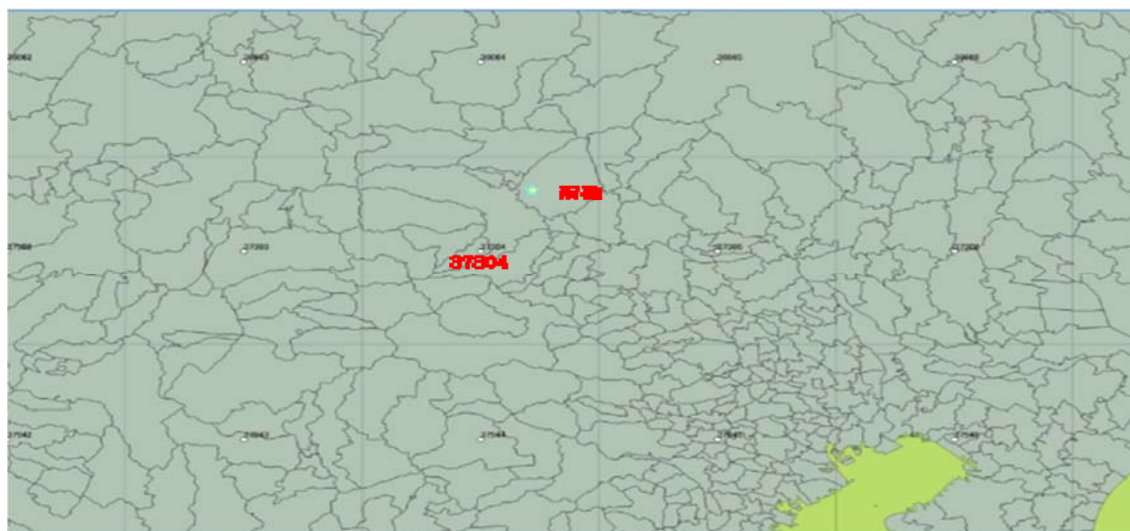
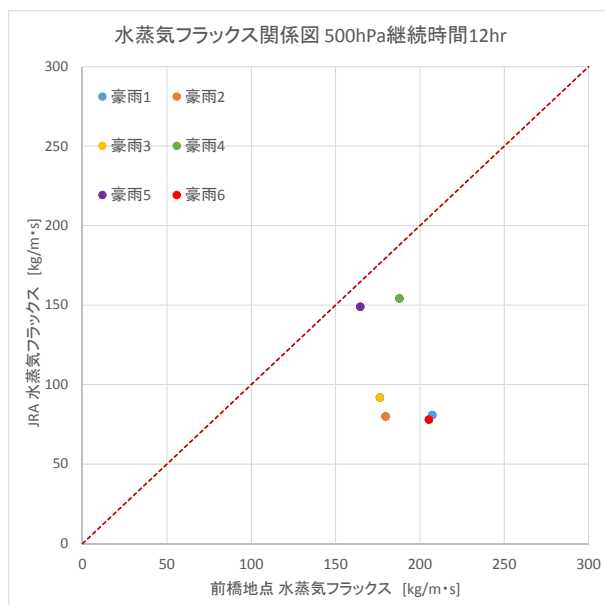


図 5.2 前橋地点と JRA55 出力地点の位置関係

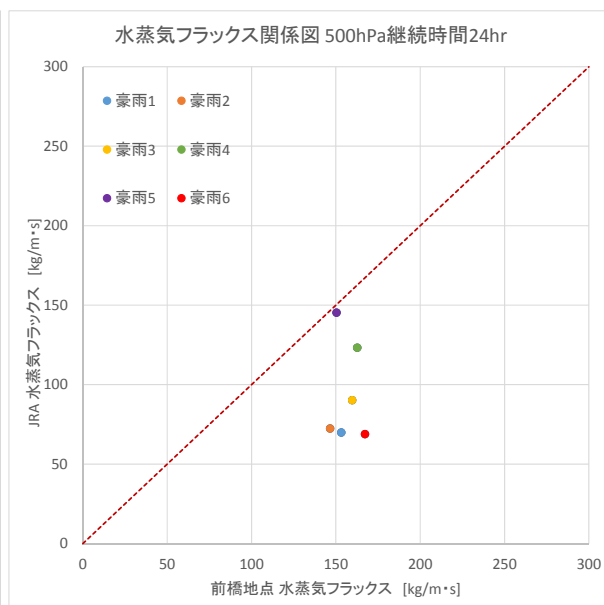
以上の方法で算定した流域毎、降雨継続時間毎の補正係数を表 5.3 に示す。黒字で示している値が表 4.4 に示した最も相関の高い気圧面、継続時間に対する補正係数である。一方、赤字で示している値が表 5.9 に示す降雨継続時間毎の PMP の整合を図った補正係数であり採用値としている。この結果から、JRA55 出力地点の水蒸気フラックスに対して前橋地点の値は 1.5 から 1.7 倍程度大きい値となっている。

表 5.3 水蒸気フラックス補正值

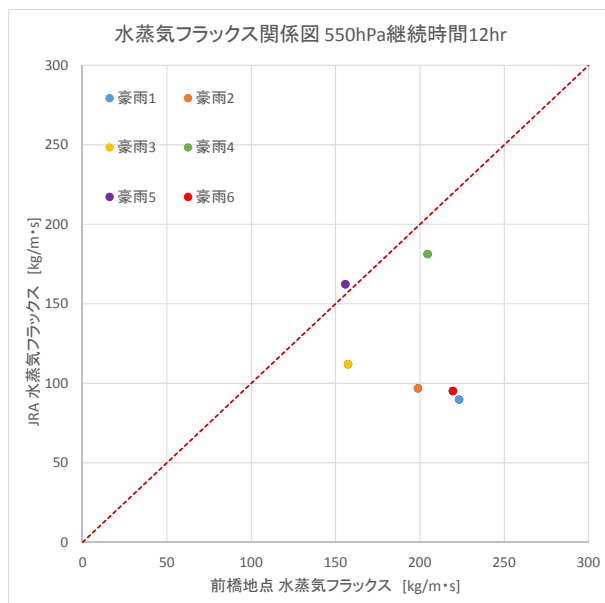
対象豪雨	流域	最大12時間降雨量			最大24時間降雨量			最大72時間降雨量		
		気圧面	継続時間	補正係数	気圧面	継続時間	補正係数	気圧面	継続時間	補正係数
6豪雨	八斗島	550hPa	12hr	1.72	500hPa	12hr	1.95	550hPa	24hr	1.55
	烏・神流川	750hPa	36hr	0.61	750hPa	36hr	0.61	500hPa	24hr	1.79
		(550hPa)	(24hr)	(1.55)	(550hPa)	(24hr)	(1.55)	(550hPa)	(24hr)	(1.55)
	吾妻川	800hPa	48hr	0.34	550hPa	12hr	1.55	550hPa	24hr	1.55
		(550hPa)	(12hr)	(1.72)						
	奥利根	800hPa	36hr	0.36	750hPa	36hr	0.61	550hPa	24hr	1.55
		(550hPa)	(24hr)	(1.55)	(550hPa)	(24hr)	(1.55)			



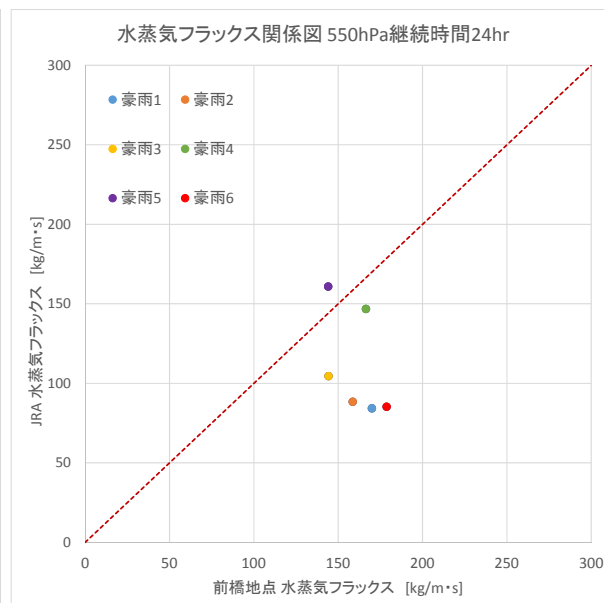
(a) 500hPa 12 時間



(b) 500hPa 24 時間

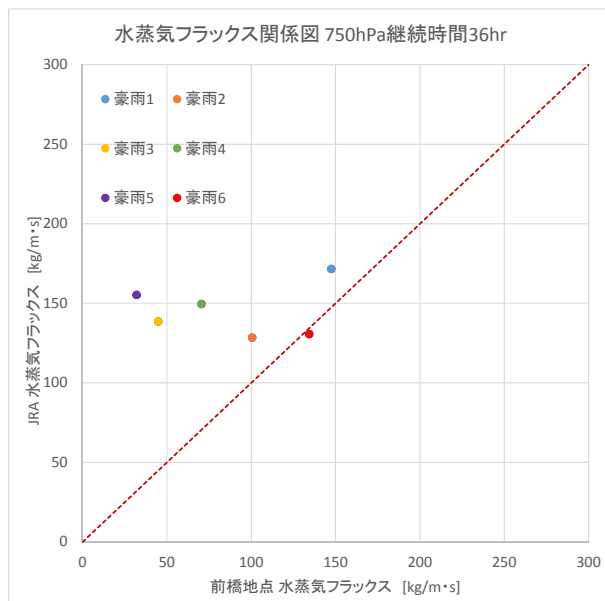


(c) 550hPa 12 時間

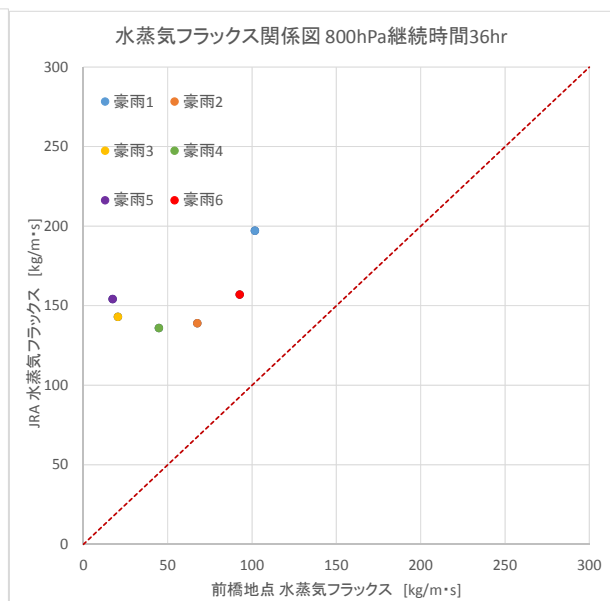


(d) 550hPa 24 時間

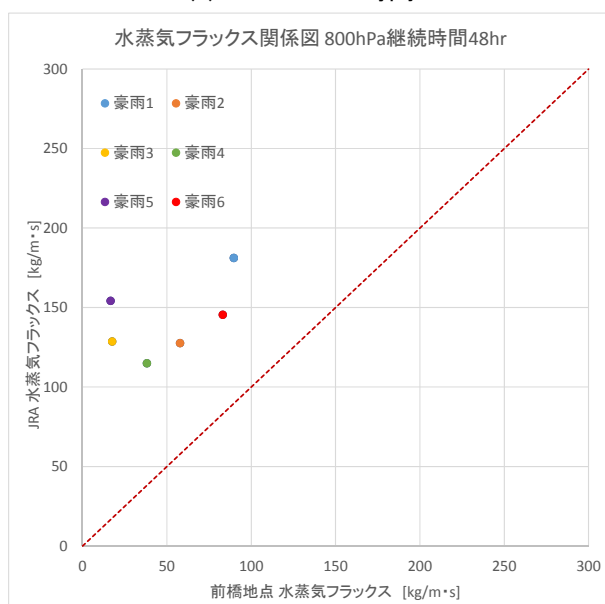
図 5.3(1) 前橋地点と JRA 計算値地点での WRF 計算値を用いた水蒸気フラックスの比較(500hPa 12 時間, 500hPa 24 時間, 550hPa 12 時間, 550hPa 24 時間)



(e) 750hPa 36 時間



(f) 800hPa 36 時間



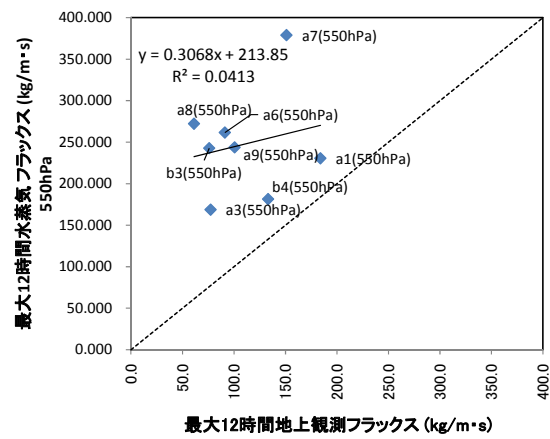
(g) 800hPa 48 時間

図 5.3 (2) 前橋地点と JRA 計算値地点での WRF 計算値を用いた水蒸気フラックスの比較(750hPa 36 時間, 800hPa 36 時間, 800hPa 48 時間)

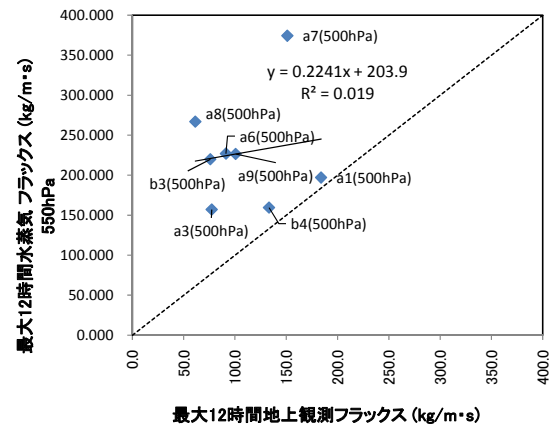
5.4.3 降雨と相関の高い気圧面における水蒸気フラックスと地上観測値の関係

利根川流域の過去の主要豪雨から流域平均 72 時間雨量が 150mm 以上となる規模の豪雨時のデータを用いて八斗島上流域 12 時間雨量, 24 時間雨量, および 72 時間雨量と相関の高い気圧面, 継続時間における関係を図 5.4~図 5.7 に示す. これらの関係図から地上観測値と上層との関係式の傾きは 0.2~0.7 の間にあることがわかる. 関係式の相関係数については, 烏・神流川流域において最大 0.8 程度の相関が得られているが相関係数が高くない流域も見られ主要洪水データの追加, 関係式作成方法などについて検討を行い精度向上を図る必要がある.

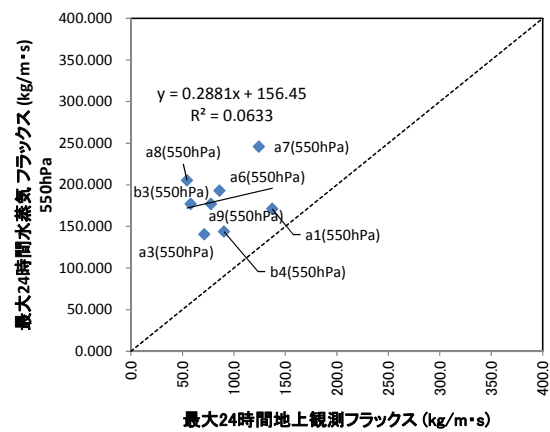
なお, 前項の補正係数の説明でも述べたように烏・神流川流域における最大 12,24,72 時間雨量, および奥利根流域における 12,24 時間雨量の推定に用いる関係は表 5.9 の降雨継続時間毎の整合性を踏まえ 550hPa における 24 時間の関係を用いている. 同様に, 吾妻川流域における 12 時間雨量の推定に用いる関係式は 550hPa における 12 時間の関係式を用いている.



(a) 12 時間

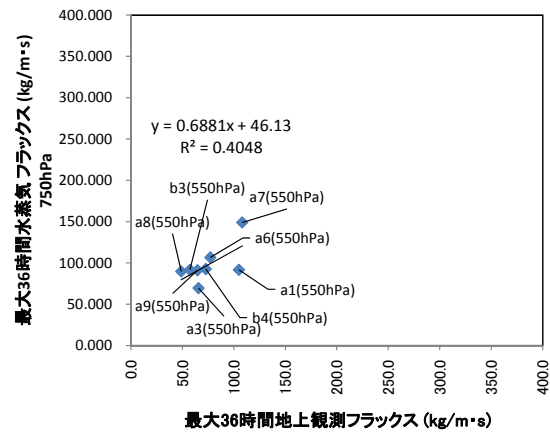


(b) 24 時間

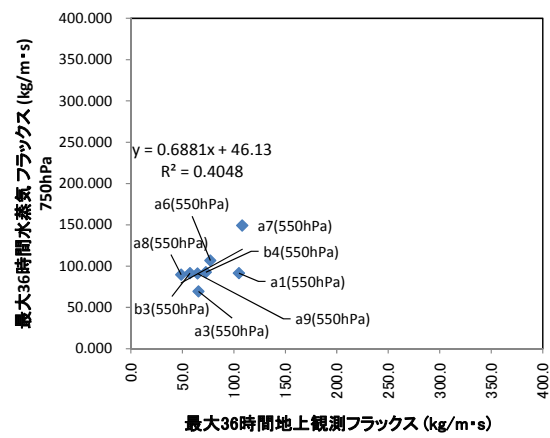


(c) 72 時間

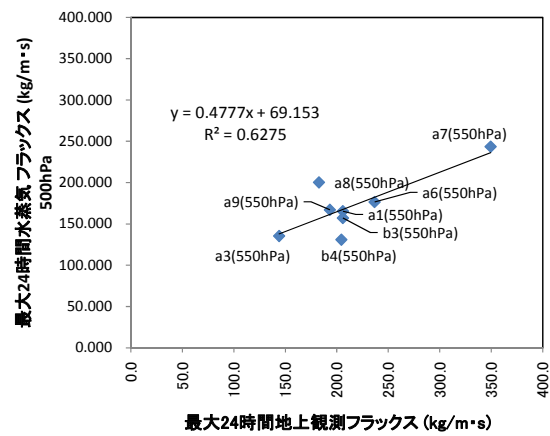
図 5.4 水蒸気フラックスの地上観測と上層の関係図(八斗島上流域)



(a) 12 時間

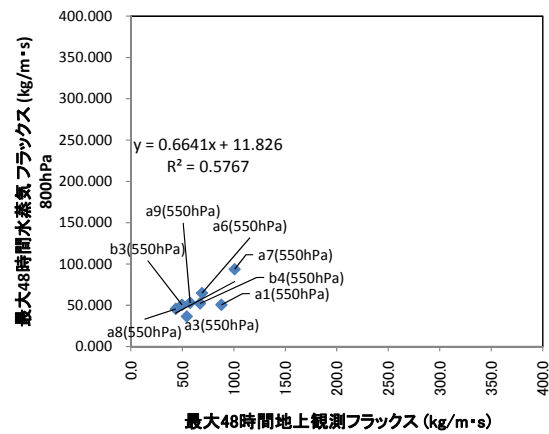


(b) 24 時間

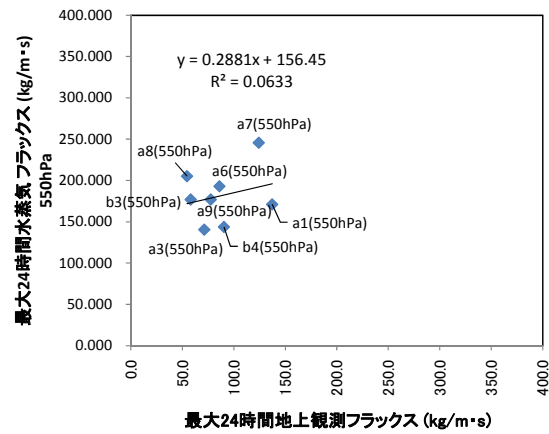


(c) 72 時間

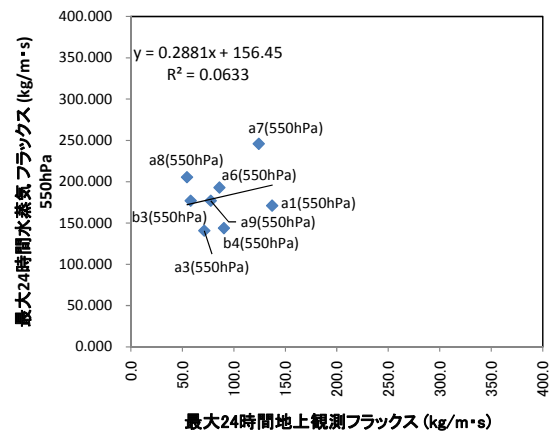
図 5.5 水蒸気フラックスの地上観測と上層の関係図(烏・神流川流域)



(a) 12 時間

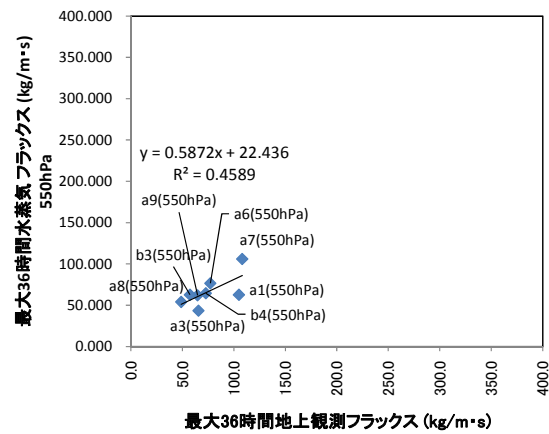


(b) 24 時間

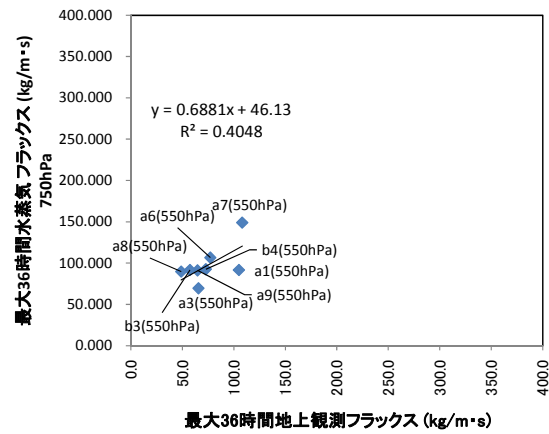


(c) 72 時間

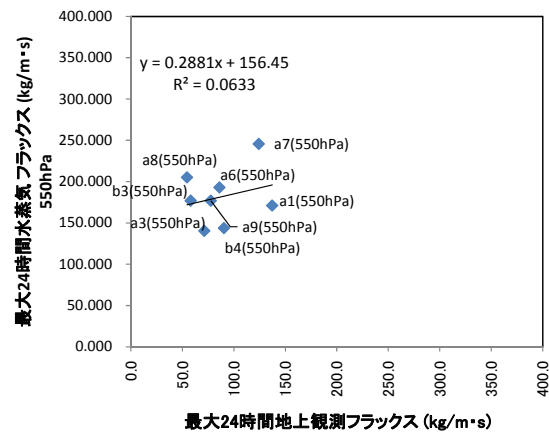
図 5.6 水蒸気フラックスの地上観測と上層の関係図(吾妻川流域)



(a) 12 時間



(b) 24 時間



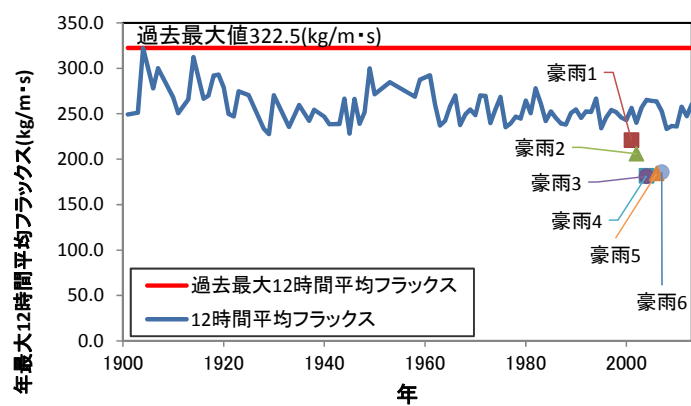
(c) 72 時間

図 5.7 水蒸気フラックスの地上観測と上層の関係図 (オリ根流域)

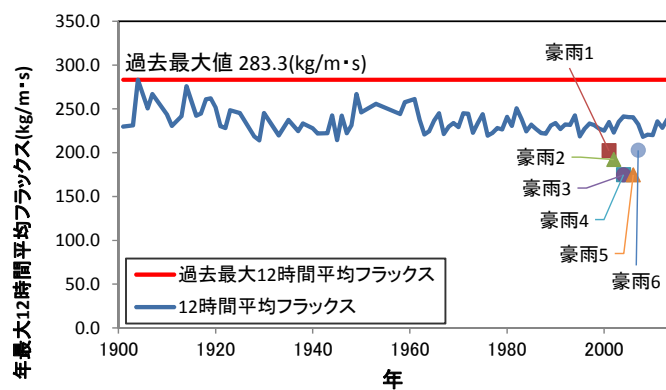
5.4.4 過去最大水蒸気フラックスの算定

ここでは、5.4.3 で作成した関係式を用いて過去の地上観測値を補正し、12、24、72 時間雨量に対する最大水蒸気フラックスを算定した。最大値は 1907 年 8 月(明治 40 年 8 月)の関東地方の流域において既往最大クラスの洪水となった台風時である。八斗島流域、烏・神流川流域、吾妻川流域、および奥利根流域における 12、24、および 72 時間雨量に対する過去最大水蒸気フラックスを図 5.8～図 5.11 に示す。八斗島流域における過去最大水蒸気フラックスは、12 時間雨量に対して $322.5 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ 、24 時間雨量に対して $283.3 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ 、72 時間雨量に対して $234.6 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ となった。

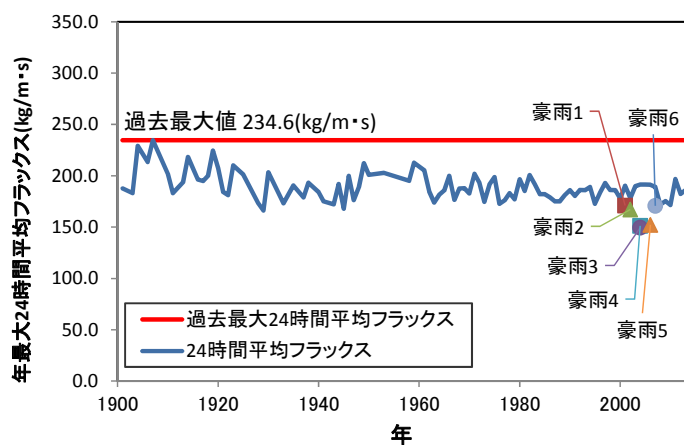
ここでも小流域については、烏・神流川流域における最大 12,24,72 時間雨量、および奥利根流域における 12、24 時間雨量の推定に用いる関係は降雨継続時間毎の整合性を踏まえ 550hPa における 24 時間の過去最大値を用いている。同様に、吾妻川流域における 12 時間雨量の推定に用いる関係式は 550hPa における 12 時間の過去最大値を用いている。以上のように推定された過去最大水蒸気フラックスを表 5.9 に示す。



(a) 12 時間

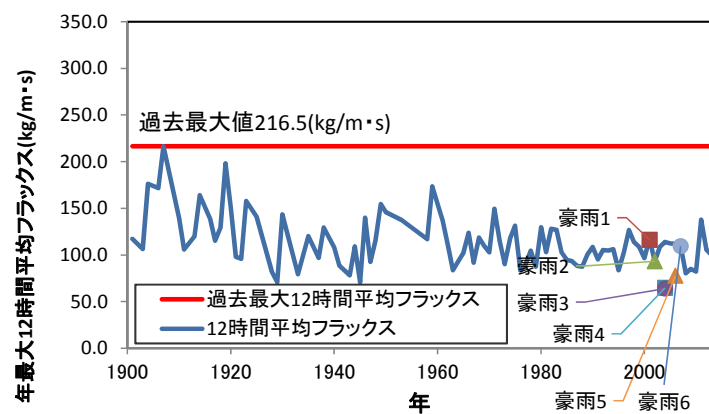


(b) 24 時間

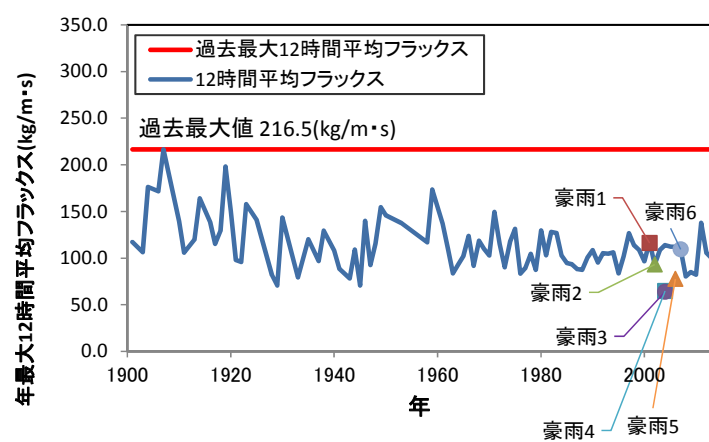


(c) 72 時間

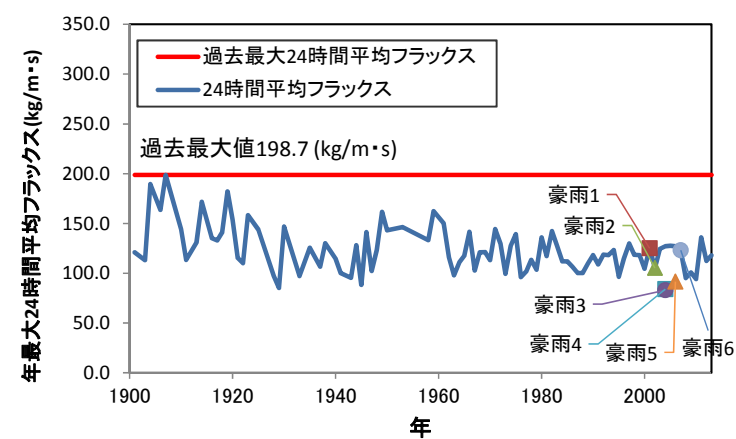
図 5.8 年最大水蒸気フラックスの経年変化(八斗島上流域)



(a) 12 時間

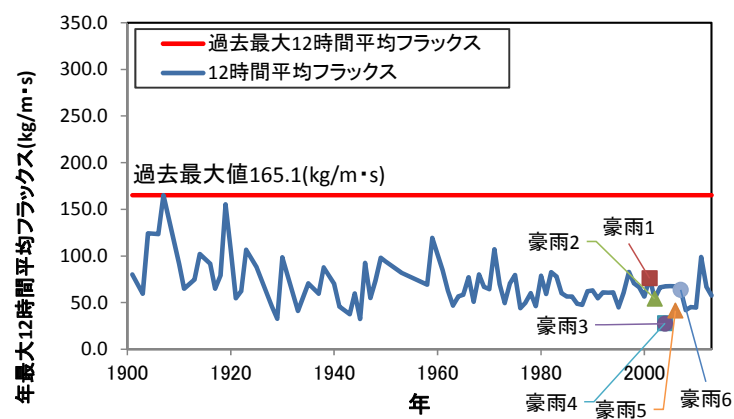


(b) 24 時間

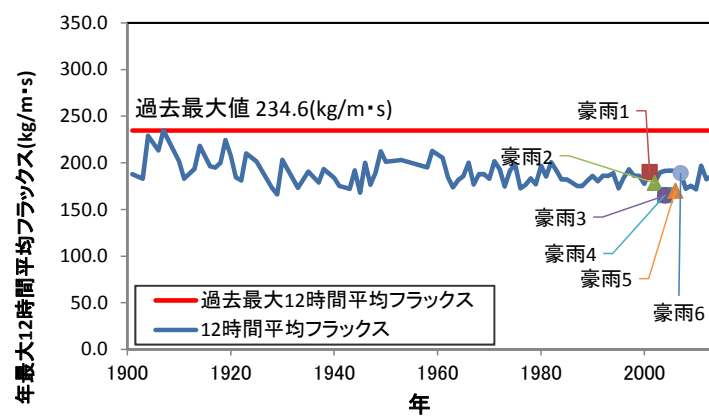


(c) 72 時間

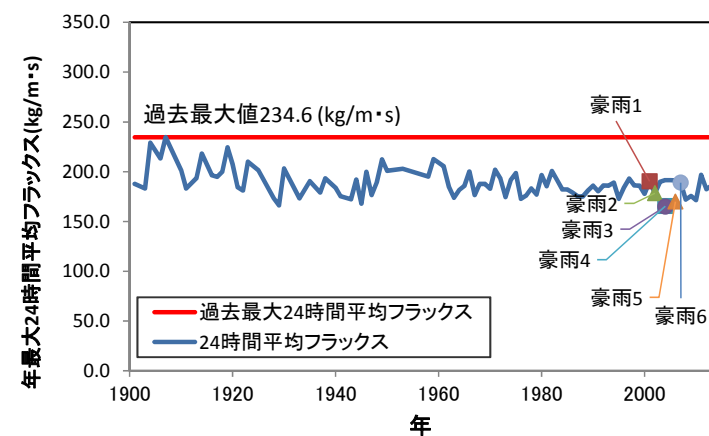
図 5.9 年最大水蒸気フラックスの経年変化(烏・神流川流域)



(a) 12 時間

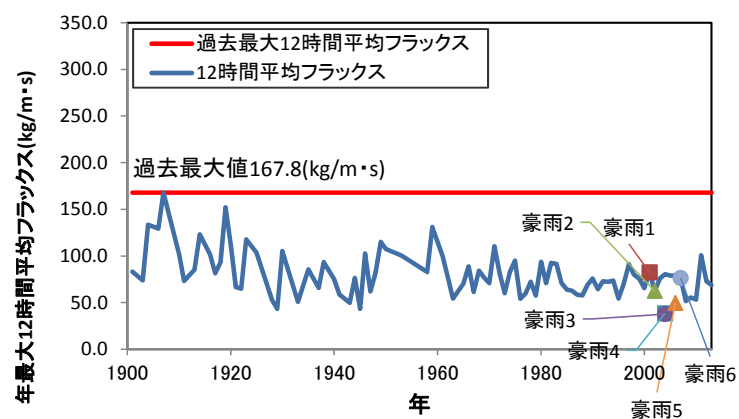


(b) 24 時間

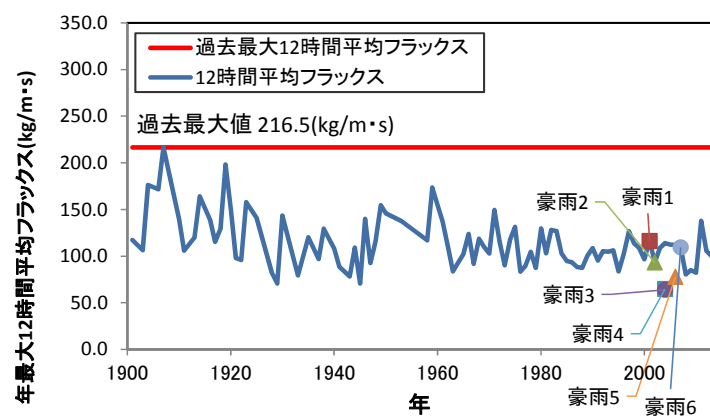


(c) 72 時間

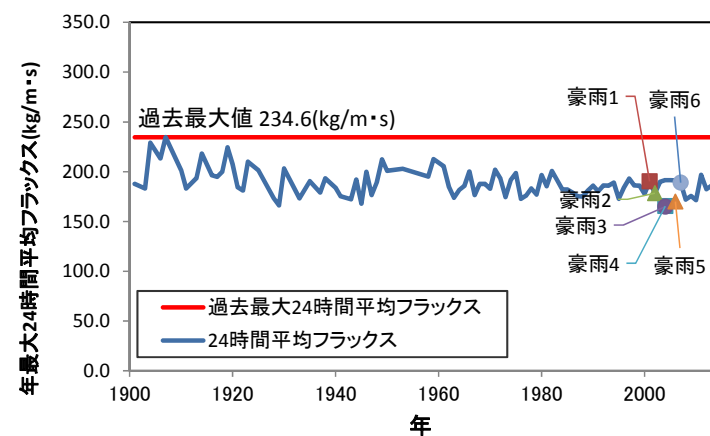
図 5. 10 年最大水蒸気フラックスの経年変化(吾妻川流域)



(a) 12 時間



(b) 24 時間



(c) 72 時間

図 5.11 年最大水蒸気フラックスの経年変化(奥利根流域)

5.5 気候変動を考慮した評価

5.5.1 将来気候における八斗島上流域の3日雨量

RCP8.5 シナリオの降雨量がアメダス地点において出力されている biascorrected データの日雨量から、八斗島上流流域平均3日雨量を20箇所のアメダス地点データを用いたテューセン法により算定した。その結果、図 5.12、および表 5.4(1) (2)に示すように9ケース180年間のデータのうち、既往最大3日雨量318mmを超えるイベントが12回発生しており(青着色)、HFA_kf_rcp85_c1のケースにおいて最大449mm/3日の降雨量が発生している。なお、表中の年月日は連続3日雨量の最初の日を示している。

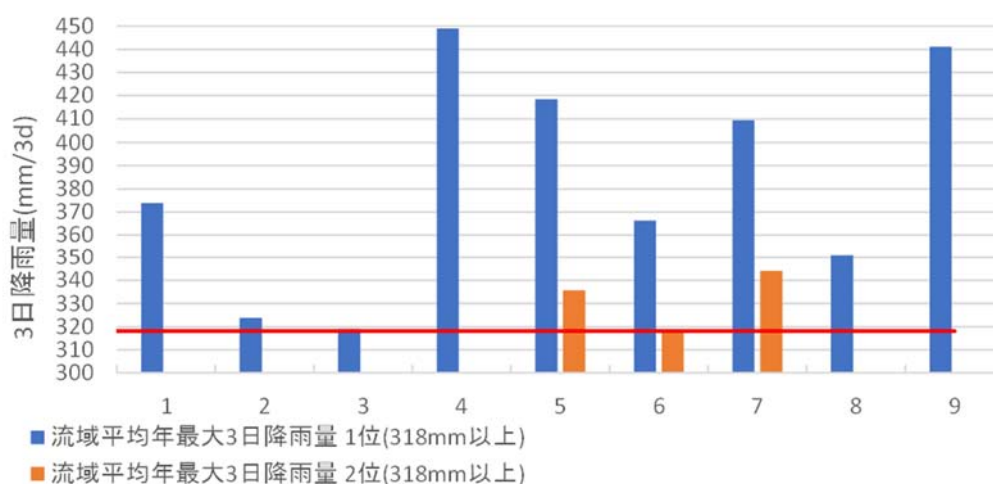


図 5.12 RCP8.5 シナリオで3日雨量が318mmを越えるイベント

表 5.4(1) RCP8.5 シナリオ 将来気候9ケースの年最大3日雨量

(a)YS スキーム

HFA_rcp85_c1	
年月日	流域平均年最大3日降雨量(mm)
2080/10/5	78.5
2081/6/1	136.6
2082/9/15	153.9
2083/9/9	98.2
2084/9/23	140.4
2085/8/24	100.8
2086/9/18	101.0
2087/8/26	68.6
2088/8/24	137.1
2089/11/2	123.4
2090/9/12	161.8
2091/9/11	265.0
2092/7/29	373.9
2093/8/19	205.9
2094/9/1	239.5
2095/7/19	105.7
2096/10/1	144.6
2097/9/7	96.9
2098/8/1	155.6
2099/9/12	88.9
2100/7/17	128.7

HFA_rcp85_c2	
年月日	流域平均年最大3日降雨量(mm)
2080/10/5	66.2
2081/9/14	123.5
2082/10/1	80.7
2083/8/30	130.1
2084/10/8	97.2
2085/9/4	79.4
2086/8/4	140.4
2087/8/30	323.8
2088/8/28	234.9
2089/9/16	105.2
2090/6/17	208.4
2091/10/15	71.0
2092/10/17	148.8
2093/8/19	100.4
2094/8/15	106.9
2095/9/19	95.5
2096/10/16	119.8
2097/9/23	164.4
2098/9/11	115.9
2099/8/11	97.9
2100/7/19	62.0

HFA_rcp85_c3	
年月日	流域平均年最大3日降雨量(mm)
2080/9/18	143.0
2081/8/24	115.6
2082/9/15	125.7
2083/8/5	197.2
2084/10/12	151.4
2085/7/15	76.7
2086/9/11	156.8
2087/7/30	295.1
2088/10/19	134.8
2089/8/19	253.3
2090/8/17	260.8
2091/9/2	159.0
2092/8/16	124.1
2093/10/8	135.7
2094/6/3	161.2
2095/7/24	282.6
2096/9/17	158.5
2097/7/6	319.1
2098/8/16	141.0
2099/7/15	168.6
2100/7/29	100.8

表 5.4(2) RCP8.5 シナリオ 将来気候 9 ケースの年最大 3 日雨量

(b)KF スキーム

HFA kf_rcp85_c1	
年月日	流域平均年最大 3日降雨量(mm)
2080/9/27	164.8
2081/10/10	191.2
2082/9/21	209.8
2083/8/8	147.9
2084/9/11	132.3
2085/9/17	174.9
2086/9/10	152.1
2087/5/19	112.3
2088/8/30	190.8
2089/6/12	100.1
2090/8/21	102.0
2091/9/10	178.5
2092/8/26	256.3
2093/7/26	163.0
2094/8/15	212.5
2095/9/22	113.9
2096/9/16	98.7
2097/8/5	449.0
2098/5/5	69.9
2099/8/9	79.6
2100/8/15	114.4

HFA kf_rcp85_c2	
年月日	流域平均年最大 3日降雨量(mm)
2080/9/7	138.2
2081/8/1	259.1
2082/10/4	197.3
2083/8/29	106.1
2084/6/9	85.2
2085/8/25	104.0
2086/9/28	205.0
2087/9/4	256.2
2088/8/25	335.7
2089/8/13	173.5
2090/8/20	418.5
2091/7/10	145.8
2092/9/14	196.1
2093/7/30	258.2
2094/6/17	101.7
2095/4/26	99.5
2096/7/11	120.5
2097/9/13	153.7
2098/9/2	277.4
2099/6/21	83.1
2100/8/24	85.9

HFA kf_rcp85_c3	
年月日	流域平均年最大 3日降雨量(mm)
2080/11/22	40.3
2081/8/21	207.5
2082/7/3	129.7
2083/8/30	160.6
2084/9/1	90.6
2085/10/3	127.2
2086/9/22	197.5
2087/8/19	263.7
2088/8/29	77.8
2089/9/22	120.3
2090/6/21	114.4
2091/5/21	129.9
2092/8/25	180.7
2093/8/6	186.5
2094/7/8	90.6
2095/9/16	217.9
2096/10/5	124.4
2097/8/6	318.9
2098/8/14	181.4
2099/8/20	366.2
2100/6/27	69.5

(c)AS スキーム

HFA as_rcp85_c1	
年月日	流域平均年最大 3日降雨量(mm)
2080/9/8	158.4
2081/7/2	107.4
2082/8/22	222.7
2083/8/14	162.9
2084/8/25	344.2
2085/6/13	144.6
2086/6/7	86.9
2087/9/5	133.9
2088/8/15	91.4
2089/9/8	134.1
2090/8/25	136.7
2091/6/16	78.2
2092/7/18	409.4
2093/6/24	111.5
2094/8/1	241.5
2095/6/23	244.5
2096/7/5	165.2
2097/6/16	126.2
2098/9/19	175.7
2099/6/13	89.5
2100/8/8	71.8

HFA as_rcp85_c2	
年月日	流域平均年最大 3日降雨量(mm)
2080/9/16	68.8
2081/8/23	172.9
2082/8/12	113.2
2083/6/9	188.6
2084/9/15	203.3
2085/9/21	268.8
2086/7/21	102.7
2087/9/14	286.6
2088/6/20	104.1
2089/6/21	205.1
2090/8/21	223.2
2091/8/28	350.7
2092/6/16	58.5
2093/7/5	62.4
2094/9/24	130.7
2095/7/31	168.3
2096/6/23	70.2
2097/5/24	129.7
2098/6/24	164.3
2099/9/27	126.8
2100/7/16	112.3

HFA as_rcp85_c3	
年月日	流域平均年最大 3日降雨量(mm)
2080/11/7	67.0
2081/8/24	261.6
2082/9/7	101.3
2083/6/18	198.0
2084/9/13	90.9
2085/10/12	49.4
2086/6/21	96.4
2087/9/7	163.7
2088/9/15	159.8
2089/11/3	176.9
2090/8/23	441.1
2091/3/10	35.3
2092/9/14	102.2
2093/8/20	236.7
2094/10/13	92.5
2095/6/9	122.8
2096/6/16	65.8
2097/2/23	81.6
2098/8/5	128.3
2099/7/22	114.1
2100/7/1	41.6

5.5.2 水蒸気フラックスの評価

(1) 水蒸気フラックスの評価方法

前橋地点における気候変動モデルの出力から、以下のように水蒸気混合比の算定を行い、風速を乗じて水蒸気フラックスを算定した。raw データにおける plev データの出力では、湿数を用いて水蒸気量が表されている。水蒸気フラックスの算定には水蒸気混合比を用いているため、以下のように変換する。

T_d : 露点温度(K), T_o : 気温(K), T_{td} : 湿数(K)には以下の関係があり、気温と湿数から露点温度を算定する。

$$T_d = T_o - T_{td} \quad (5.1)$$

露点温度における飽和水蒸気圧を水蒸気圧 $e=e_{sat}$ (hPa)の状態としてテイーテンスの式により算定する。ただし以下の式は絶対温度ではなく摂氏で用いる。

$$e = 6.1078 \times 10^{7.5T/(237.3+T)} \quad (5.2)$$

以上より、水蒸気圧 e が算定されるので、水蒸気混合比 r は、以下の式から得られる。

$$r = \frac{\rho_w}{\rho_d} = \frac{R_d \cdot e}{R_w \cdot (P - e)} = \frac{\varepsilon \cdot e}{P - e} = 0.622 \frac{e}{P - e} \quad (5.3)$$

ここで、 P は気圧(hPa)である。

(2) 気候変動予測値における最大水蒸気フラックス

気候変動予測値の水蒸気フラックスは図 5.13 に白丸で示す前橋地上観測所地点近傍の 13484 出力地点の値を用いた。この出力地点における 9 ケースの気候変動予測値の 500hPa における 12 時間, 24 時間最大水蒸気フラックスは, Kain-Fritsch スキーム(KF 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)において 364.2 kg/m・s, 24 時間最大値が 306.8 kg/m・s となった。

次に, 水蒸気フラックスと降雨量の関係式は 550hPa における値として作成されているため, 4 章において計算を実施し 6 豪雨×6 ケースの WRF この結果から, 図 5.14 および図 5.15 に示すように 500hPa と 550hPa における水蒸気フラックスの関係式を作成した。この関係式から気候変動予測値の 500hPa における最大水蒸気フラックスを 550hPa における値に変換し, 12 時間最大値が 376 kg/m・s, 24 時間最大値が 312 kg/m・s を用いて気候変動を考慮した PMP の算定を行う水蒸気フラックスとした。

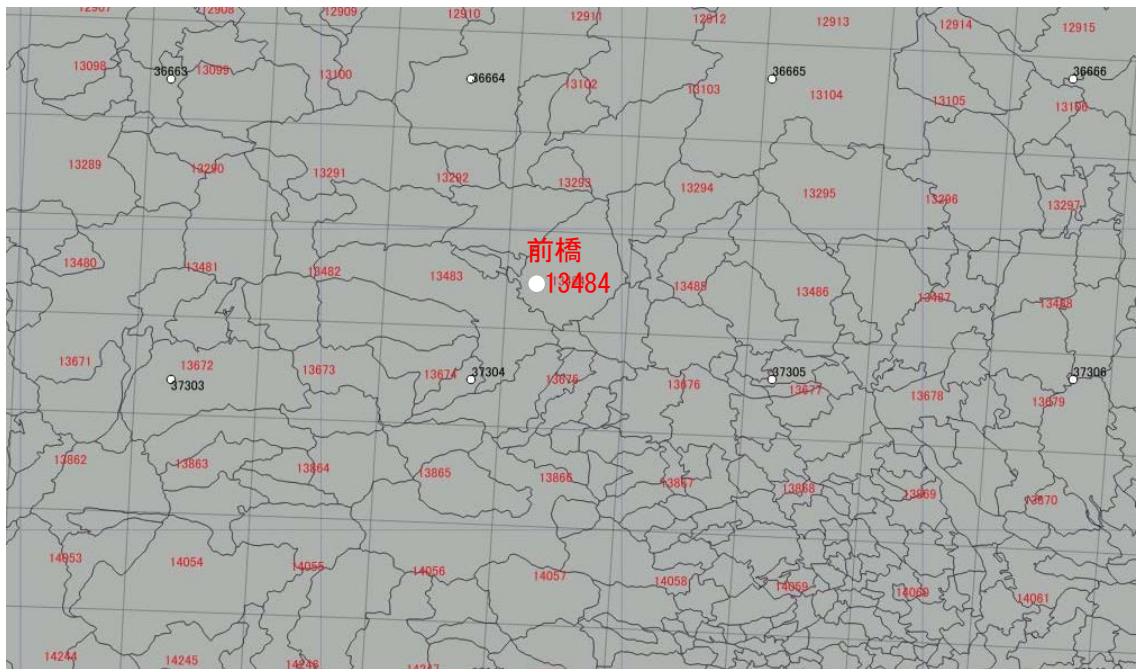


図 5.13 前橋地点と気候モデル格子の位置関係

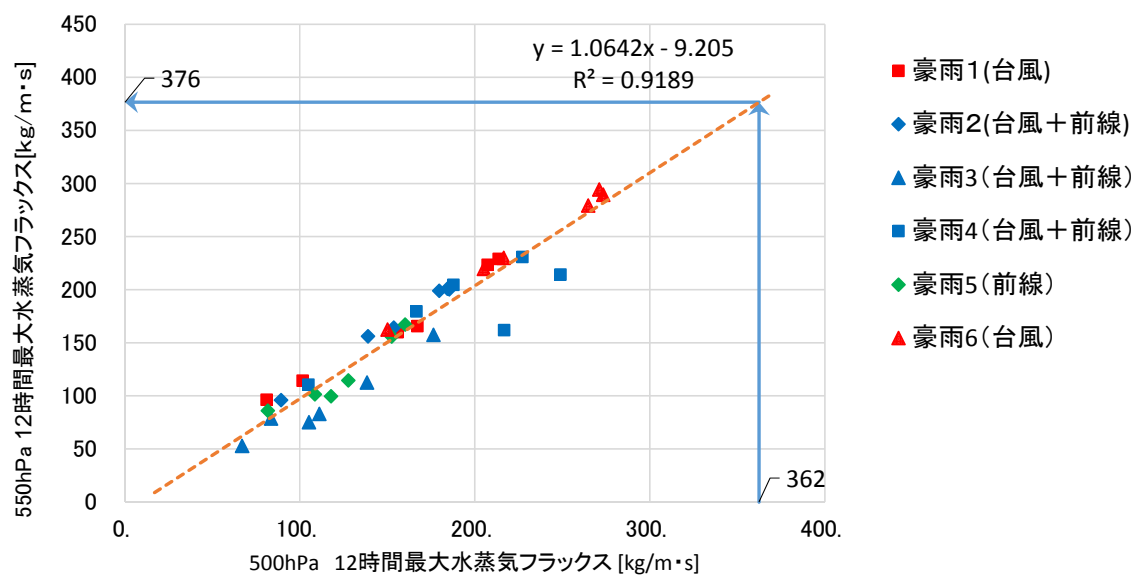


図 5.14 500hPa および 550hPa における 12 時間最大水蒸気フラックスの関係

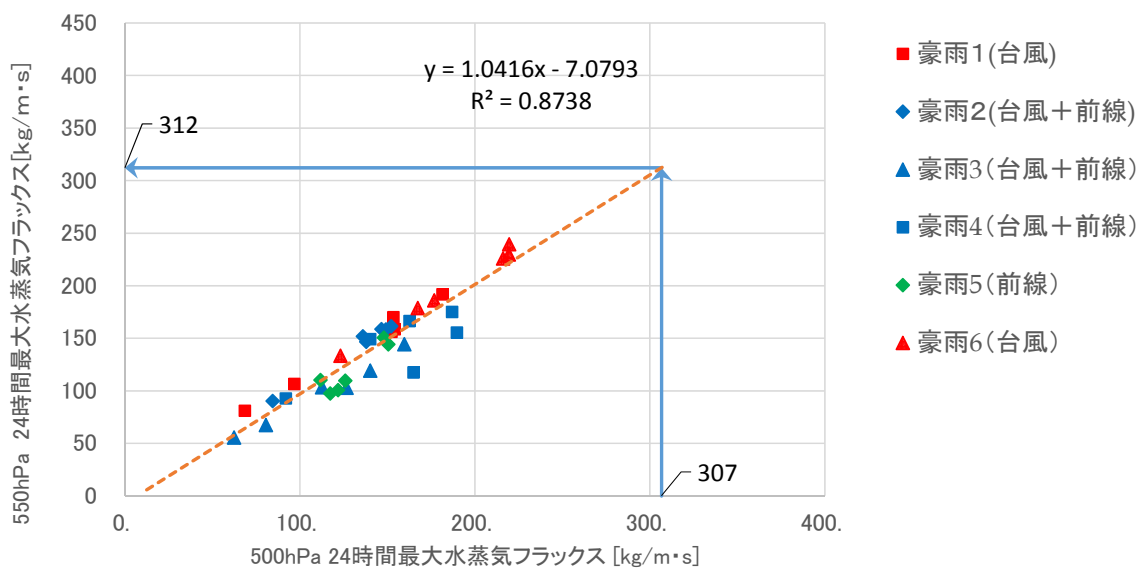


図 5.15 500hPa および 550hPa における 24 時間最大水蒸気フラックスの関係

5.6 PMPの評価

5.6.1 現況での PMP 評価

5.4 の過去最大水蒸気フラックスの評価結果から、第 4 章において作成した水蒸気フラックスと降雨量の関係から PMP の算定を行った。

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降雨量と相関の高い 500～550hPa 気圧面相当に変換し、その値から推定した最大雨量を図 5.16～図 5.19 の青線で示した。72 時間雨量における PMP 相当の最大雨量は図 5.16(c)に示すように 341mm となり、カスリン台風時の雨量を越える規模となった。また 12 時間雨量、24 時間雨量については 6 豪雨の計算条件を変化させた WRF の計算結果の最大降雨量程度となっている。

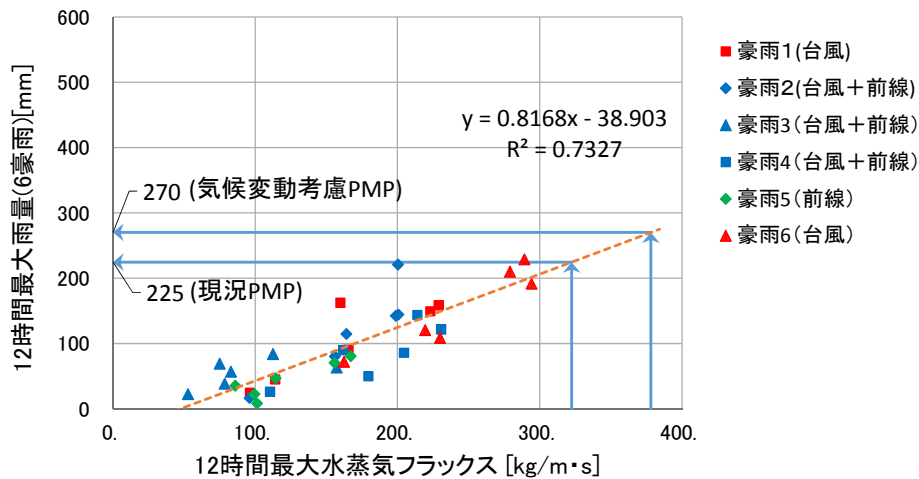
6 豪雨を対象とした 12, 24, 72 時間の継続時間毎に、検討対象 6 豪雨の実績最大値、WRF を用いた 36 個の計算結果の最大値、および過去最大の水蒸気フラックスから推定した最大値の比較を表 5.5(1)に示す。この結果から、降雨継続時間が短いほど実績最大降雨量に対する最大降雨量の比率が大きくなっていることがわかる。WRF 計算値に対しては 1.49 倍～2.08 倍、過去最大水蒸気フラックスからの推定においては 1.32 倍～2.05 倍となっている。この結果は小林ら²⁾の淀川流域における実績最大雨量に対する最大化した雨量の倍率 1.5 倍と同程度の値である。また、降雨継続時間が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、地域分布を考慮した烏・神流川流域、吾妻川流域および奥利根流域の PMP は表 5.5(2)～(4)に示す。地域毎の過去最大最大フラックスから算定した 12, 24, 72 時間の最大雨量は図 5.20 に示すように烏・神流川流域、吾妻川流域、奥利根流域の順に大きくなっており実績最大雨量と同様な傾向を示している。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は八斗島流域と同様である。実績降雨量に対する比率は、WRF 計算値に対しては烏・神流川流域が 1.26 倍～1.81 倍、吾妻川流域が 1.66 倍～2.29 倍、奥利根流域が 1.69 倍～2.45 倍となっている。過去最大水蒸気フラックスからの推定においては烏・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 倍と吾妻川流域および奥利根川流域が烏・神流川流域に対して実績最大値に対する増加率が大きくなっている。

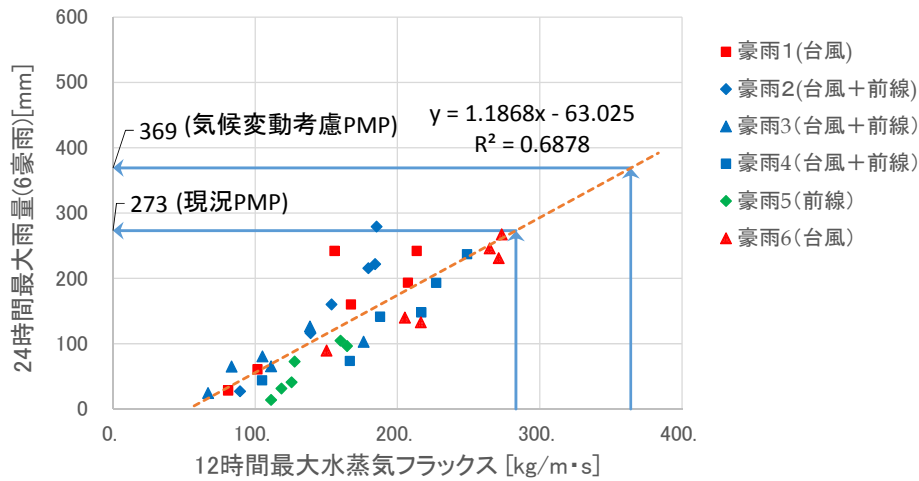
なお、継続時間について各流域および各継続時間において最も相関の高い気圧面と継続時間は表 4.4 において示したとおりであるが、各地域においては 72 時間が 500～550hPa の相関が高くなっているのに対して継続時間が短い 12, 24 時間継続時間では第 4 章に示したように 750～800hPa における相関が高くなっている。このため、水蒸気フラックスと降水量の関係式の傾きが大きくなるため、降雨継続時間が短い 12 時間 PMP が 24 時間 PMP より大きくなるという不整合が生じた。このような課題に対して降雨の時間分布の整合を図るため、各地域において降雨継続時間毎の PMP を算定するための関係式は 550hPa 気圧面において最も相関が高くなる水蒸気フラックスの継続時間として算定した。その結果、表 5.9 の赤字に示すように降雨継続時間毎の不整合は解消されたため、これらを継続時間毎の PMP とした。なお、このような補正を行った場合の水蒸気フラックスと降雨量の相関係数は 0.75 以上となっている。

5.6.2 気候変動を考慮した PMP 評価

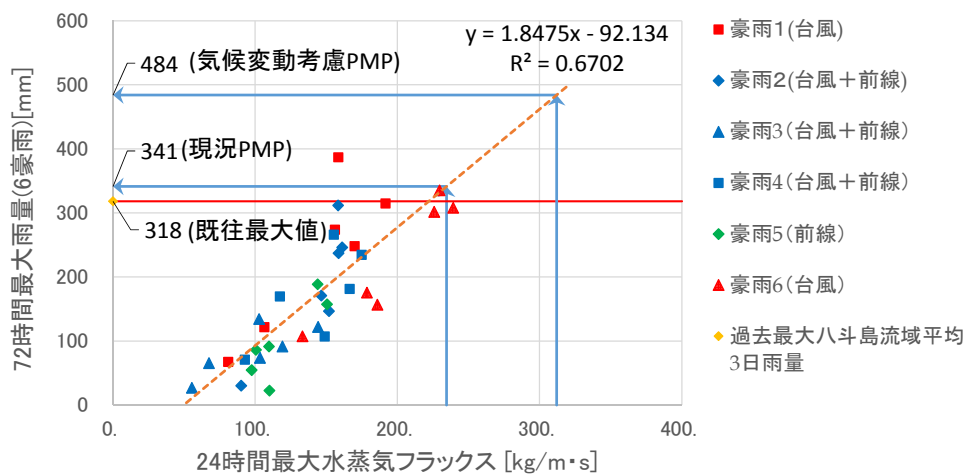
5.5において算定した気候変動予測値からの最大水蒸気フラックスを用いて、図 5.14, 図 5.15に示すように最大 12 時間雨量, および最大 72 時間雨量を算定する関係式は 550hPa 相当に変換して, WRF 計算値から作成した水蒸気フラックスと降雨量の関係式から 12hr, 24hr, 72hr 雨量は, それぞれ 274mm, 369mm, 496mm となった. 以上の方法により算定した気候変動を考慮した PMP を先に示した図 5.16~図 5.19 における現況での PMP とあわせて示した. 表 5.5~表 5.8 には気候変動を考慮した最大降雨量と実績最大値の比率を示している. 気候変動を考慮した 12, 24, 72 時間の最大雨量は烏・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こと, 降雨継続時間が短いほうが実績最大雨量に対する比率が大きくなっており, 集中度の高い豪雨となることは現況での評価と同様である. 実績降雨量に対する比率は, 烏・神流川流域が 1.45 倍~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 倍と吾妻川流域および奥利根川流域が烏・神流川流域に対して実績最大値に対する増加率が大きくなっており, 現況での評価と同様な傾向である.



(a) 12 時間雨量

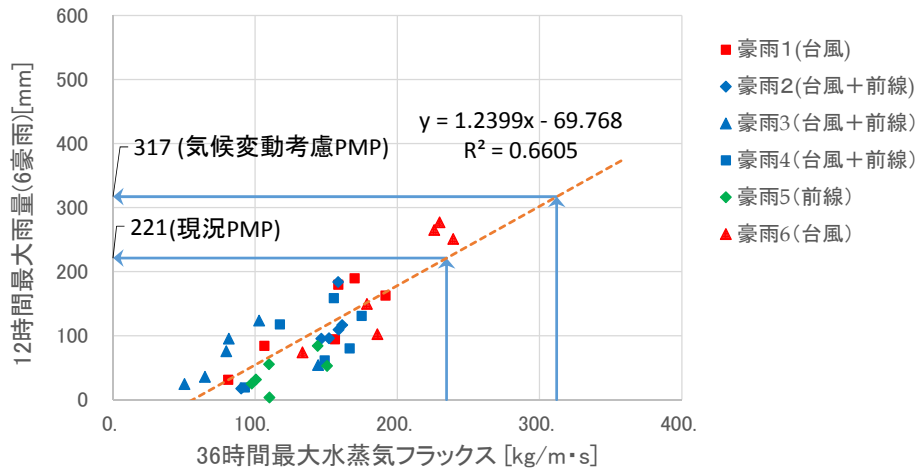


(b) 24 時間雨量

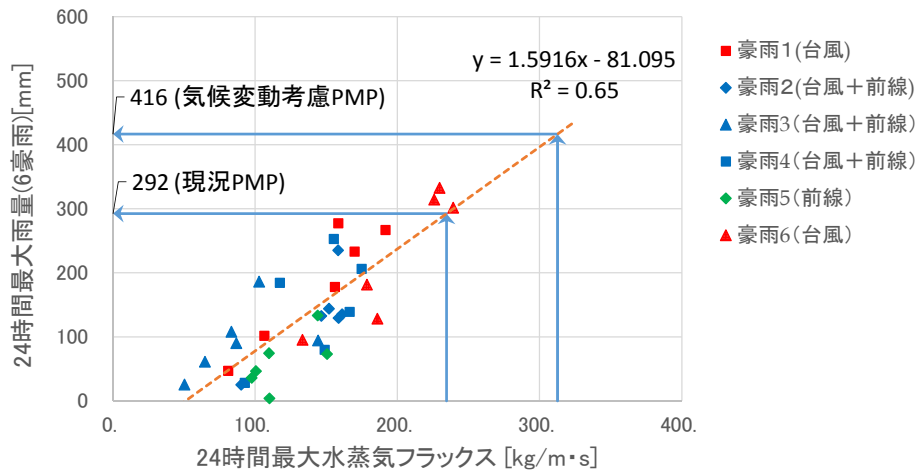


(c) 72 時間雨量

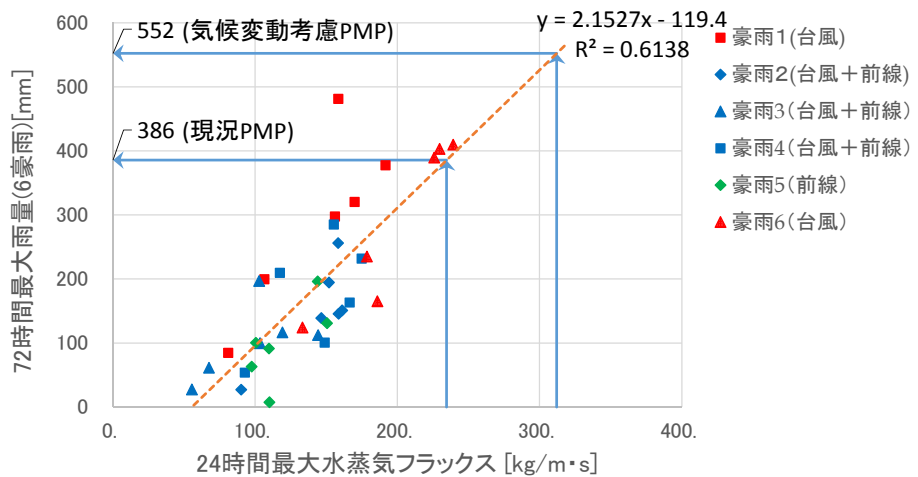
図 5.16 継続時間毎の八斗島上流域平均雨量の PMP



(a) 12 時間雨量

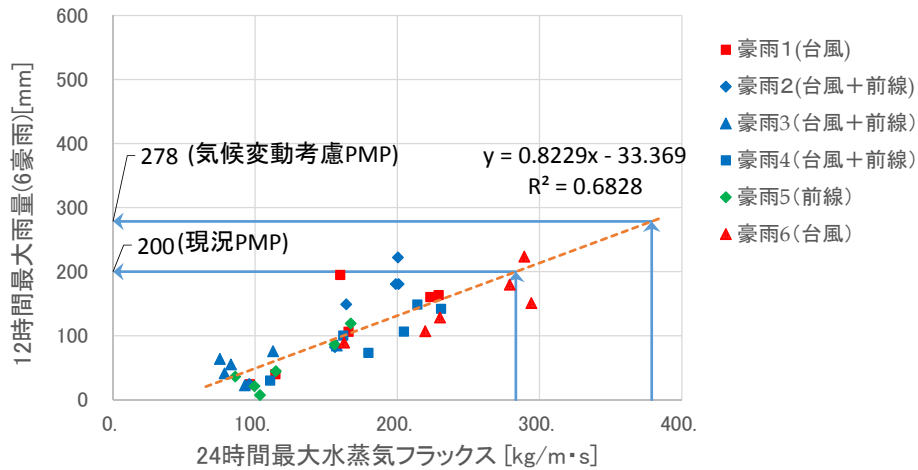


(b) 24 時間雨量

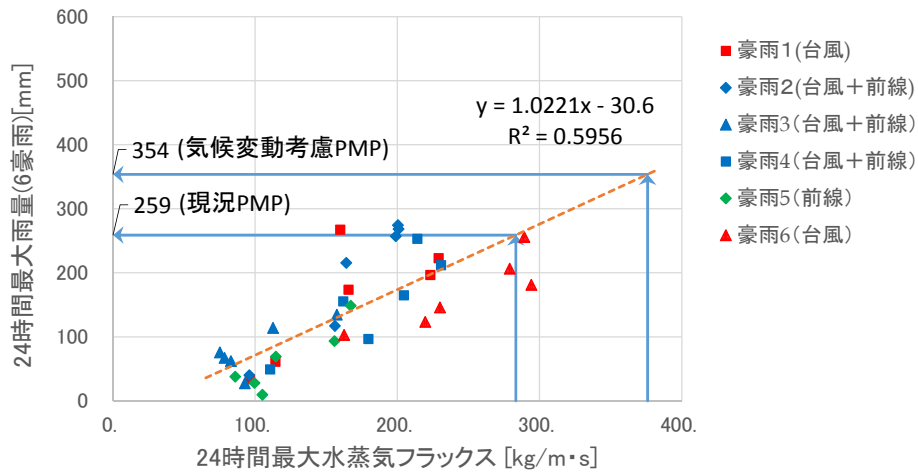


(c) 72 時間雨量

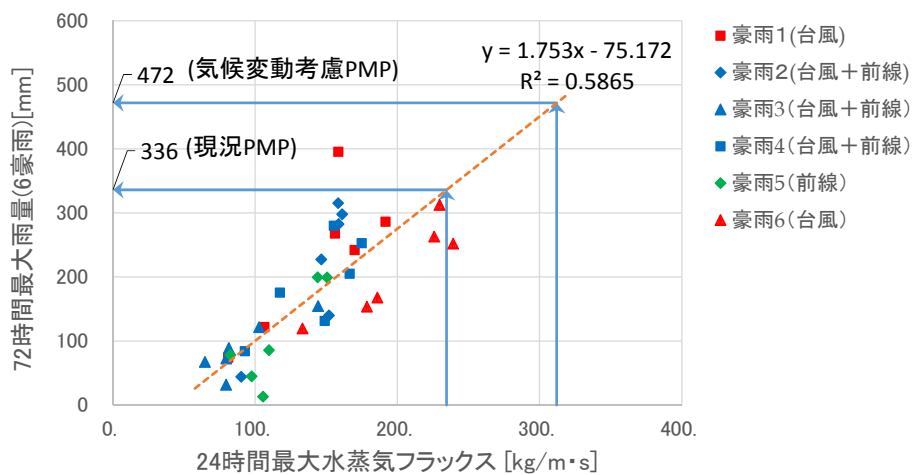
図 5.17 継続時間毎の烏・神流川流域平均雨量の PMP



(a) 12 時間雨量

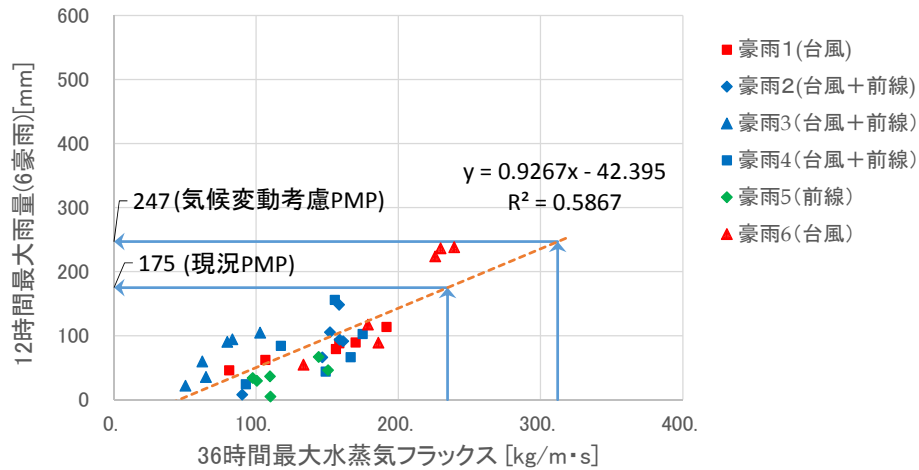


(b) 24 時間雨量

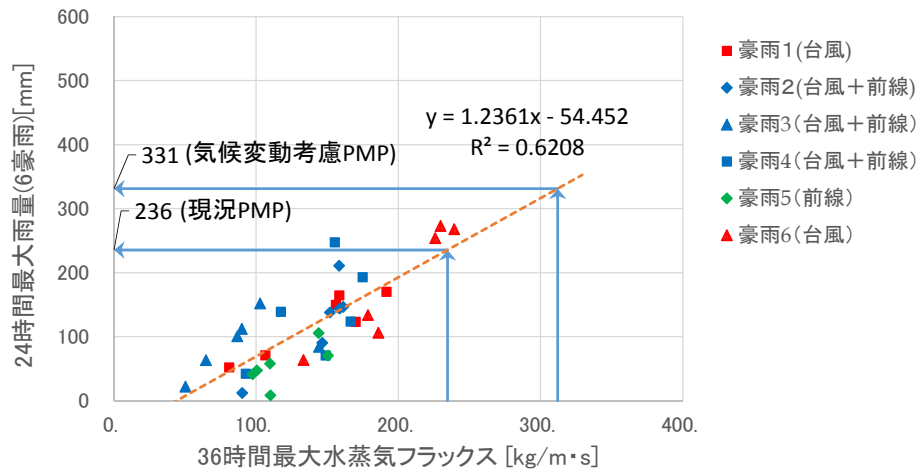


(c) 72 時間雨量

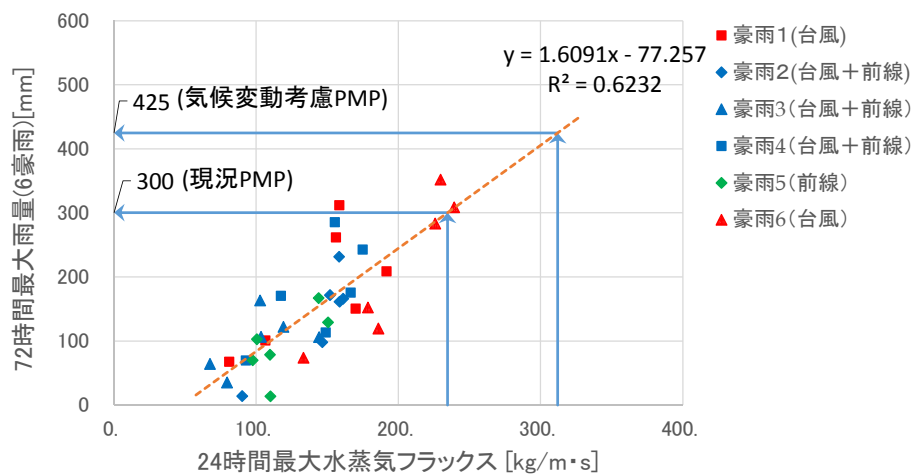
図 5.18 継続時間毎の吾妻川流域平均雨量の PMP



(a) 12 時間雨量



(b) 24 時間雨量



(c) 72 時間雨量

図 5.19 継続時間毎のオリ根流域平均雨量の PMP

表 5.5 検討対象豪雨の実績最大雨量と WRF 計算値，過去最大および気候変動を考慮した水蒸気フラックスからの雨量の比較（八斗島上流域）

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
③気候変動を考慮した最大フラックスから推定した最大降雨量	270.0	369.0	484.0
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
③と実績最大値の比率	2.46	2.46	1.87

表 5.6 検討対象豪雨の実績最大雨量と WRF 計算値，過去最大および気候変動を考慮した水蒸気フラックスからの雨量の比較（烏・神流川流域）

最大降雨量	烏・神流川流域平均降雨量 (mm)		
	12時間	24時間	72時間
実績最大降雨量（豪雨6：台風性）	153.3	216.3	382.0
①WRF計算結果の最大降雨量(6豪雨×6ケース=36個)	276.9	332.4	481.2
②過去最大フラックスから推定した最大降雨量	221.0	292.0	386.0
③気候変動を考慮した最大フラックスから推定した最大降雨量	317.0	416.0	552.0
①と実績最大値の比率	1.81	1.54	1.26
②と実績最大値の比率	1.44	1.35	1.01
③と実績最大値の比率	2.07	1.92	1.45

表 5.7 検討対象豪雨の実績最大雨量と WRF 計算値，過去最大および気候変動を考慮した水蒸気フラックスからの雨量の比較(吾妻川流域)

最大降雨量	吾妻川流域平均降雨量 (mm)		
	12時間	24時間	72時間
実績最大降雨量(12, 72時間は豪雨6：台風性, 24時間は豪雨5：梅雨前線)	97.3	140.0	238.8
①WRF計算結果の最大降雨量(6豪雨×6ケース=36個)	223.2	274.4	395.5
②過去最大フラックスから推定した最大降雨量	200.0	259.0	336.0
③気候変動を考慮した最大フラックスから推定した最大降雨量	278.0	354.0	472.0
①と実績最大値の比率	2.29	1.96	1.66
②と実績最大値の比率	2.06	1.85	1.41
③と実績最大値の比率	2.86	2.53	1.98

表 5.8 検討対象豪雨の実績最大雨量と WRF 計算値，過去最大および気候変動を考慮した水蒸気フラックスからの雨量の比較(奥利根流域)

最大降雨量	奥利根流域平均降雨量 (mm)		
	12時間	24時間	72時間
実績最大降雨量(12, 24時間は豪雨2：台風+梅雨前線, 72時間は豪雨5：梅雨前線)	97.1	141.5	208.0
①WRF計算結果の最大降雨量(6豪雨×6ケース=36個)	238.0	273.3	351.6
②過去最大フラックスから推定した最大降雨量	175.0	236.0	300.0
③気候変動を考慮した最大フラックスから推定した最大降雨量	247.0	331.0	425.0
①と実績最大値の比率	2.45	1.93	1.69
②と実績最大値の比率	1.80	1.67	1.44
③と実績最大値の比率	2.54	2.34	2.04

表 5.9 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	流域	降雨継続時間	最大12時間降雨量			最大24時間降雨量			最大72時間降雨量		
6豪雨	八斗島	相関の高い水蒸気フラックスの気圧面と継続時間	相関係数	気圧面	継続時間	相関係数	気圧面	継続時間	相関係数	気圧面	継続時間
			0.856	550hPa	12hr	0.829	500hPa	12hr	0.819	550hPa	24hr
		最大水蒸気フラックス	322.5			283.3			234.6		
		PMP	225			273			341		
	烏・神流川	相関の高い水蒸気フラックスの気圧面と継続時間	相関係数	気圧面	継続時間	相関係数	気圧面	継続時間	相関係数	気圧面	継続時間
			0.822 (0.812)	750hPa (550hPa)	36hr (24hr)	0.879 (0.806)	750hPa (550hPa)	36hr (24hr)	0.840 (0.783)	500hPa (550hPa)	24hr (24hr)
		最大水蒸気フラックス	216.5(234.6)			216.5(234.6)			198.7(234.6)		
		PMP	334(221)			326(292)			279(386)		
	吾妻川	相関の高い水蒸気フラックスの気圧面と継続時間	相関係数	気圧面	継続時間	相関係数	気圧面	継続時間	相関係数	気圧面	継続時間
			0.874 (0.826)	800hPa (550hPa)	48hr (12hr)	0.771	550hPa	12hr	0.766	550hPa	24hr
		最大水蒸気フラックス	165.1(283.3)			283.3			234.6		
		PMP	409(200)			259			336		
	奥利根	相関の高い水蒸気フラックスの気圧面と継続時間	相関係数	気圧面	継続時間	相関係数	気圧面	継続時間	相関係数	気圧面	継続時間
			0.861 (0.787)	800hPa (550hPa)	36hr (24hr)	0.871 (0.788)	750hPa (550hPa)	36hr (24hr)	0.789	550hPa	24hr
		最大水蒸気フラックス	167.8(234.6)			216.5(234.6)			234.6		
		PMP	340(175)			331(236)			300		

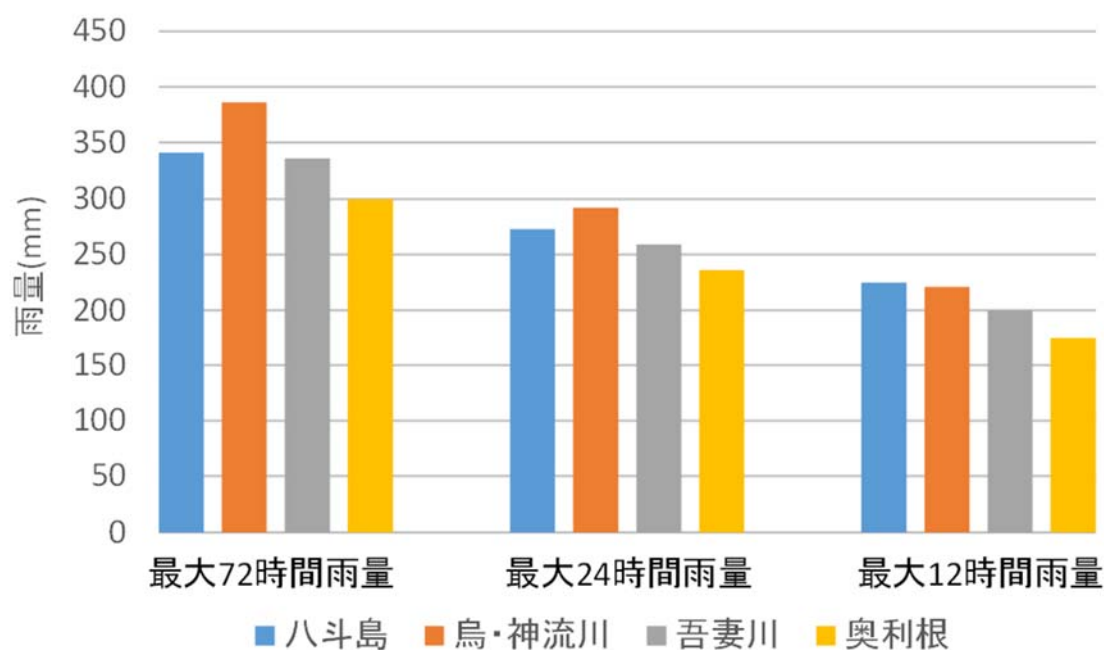


図 5.20 降雨継続時間毎，流域毎の PMP

5.7 時空間分布の評価

検討対象 6 豪雨について PMP の時空間分布の作成を行った。流域ごと継続時間毎の引き伸ばし率を表 5.10～表 5.15 に示す。なお、波形については表 5.9 に示す各流域各継続時間の PMP に対して、降雨継続時間の短い時間帯を先取りして作成した。たとえば、豪雨 6 の八斗島流域では相対湿度 100% の WRF 計算結果に対して、12 時間雨量が 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。以上の方法を用いて、6 豪雨の現況および気候変動考慮の八斗島地点および小流域である烏・神流川流域、吾妻川流域、奥利根流域における時間分布を図 5.21～図 5.44 に示す。なお、PMP に対する引き伸ばし率は地域、継続時間によっては 1.0 以下となる場合もある。このような場合、実績雨量をそのまま用いて降雨波形を作成する方法も考えられるが、その場合他の継続時間において PMP を超えてしまうこととなる。このため PMP が実績雨量より小さい場合は引縮めを行い、12、24、および 72 時間雨量がそれぞれ PMP を上回らないような時空間分布を作成した。

表 5.10 PMP に対する引き伸ばし率（豪雨 1）

(a) 現況 PMP に対する引き伸ばし率

流域		12hr	24hr	72hr
八斗島	相対湿度100%雨量	90	160	273
	PMP	225	273	341
	引き伸ばし率	2.48	1.71 (0.70)	1.25 (0.60)
烏・神流川	相対湿度100%雨量	94	165	286
	PMP	221	292	386
	引き伸ばし率	2.34	1.77 (1.01)	1.35 (0.77)
吾妻川	相対湿度100%雨量	106	173	268
	PMP	200	259	336
	引き伸ばし率	1.89	1.49 (0.87)	1.25 (0.82)
奥利根	相対湿度100%雨量	79	150	262
	PMP	175	236	300
	引き伸ばし率	2.22	1.58 (0.86)	1.15 (0.66)

()内の数値は12～24hr、あるいは24～72hrの雨量の引き伸ばし率を表す。

(b) 気候変動考慮 PMP に対する引き伸ばし率

流域		12hr	24hr	72hr
八斗島	相対湿度100%雨量	90	160	273
	PMP	270	369	484
	引き伸ばし率	2.99	2.31 (1.43)	1.77 (1.01)
烏・神流川	相対湿度100%雨量	94	165	286
	PMP	317	416	552
	引き伸ばし率	3.36	2.53 (1.41)	1.93 (1.12)
吾妻川	相対湿度100%雨量	106	173	268
	PMP	278	354	472
	引き伸ばし率	2.63	2.04 (1.12)	1.76 (1.25)
奥利根	相対湿度100%雨量	79	150	257
	PMP	247	331	425
	引き伸ばし率	3.13	2.21 (1.18)	1.65 (0.95)

()内の数値は12～24hr、あるいは24～72hrの雨量の引き伸ばし率を表す。

表 5.11 PMP に対する引き伸ばし率（豪雨 2）

(a) 現況 PMP に対する引き伸ばし率

流域		12hr	24hr	72hr
八斗島	実績雨量	142	215	237
	PMP	225	273	341
	引き伸ばし率	1.58	1.27 (0.67)	1.44 (3.13)
烏・神流川	実績雨量	89	131	165
	PMP	221	292	386
	引き伸ばし率	2.48	2.22 (1.68)	2.34 (2.83)
吾妻川	実績雨量	73	112	137
	PMP	200	259	336
	引き伸ばし率	2.75	2.30 (1.49)	2.46 (3.18)
奥利根	実績雨量	97	141	176
	PMP	175	236	300
	引き伸ばし率	1.80	1.67 (1.37)	1.70 (1.84)

()内の数値は12～24hr, あるいは24～72hrの雨量の引き伸ばし率を表す。

(b) 気候変動考慮 PMP に対する引き伸ばし率

流域		12hr	24hr	72hr
八斗島	実績雨量	142	215	237
	PMP	270	369	484
	引き伸ばし率	1.90	1.71 (1.35)	2.04 (5.28)
烏・神流川	実績雨量	89	131	165
	PMP	317	416	552
	引き伸ばし率	3.56	3.17 (2.34)	3.35 (4.09)
吾妻川	実績雨量	73	112	137
	PMP	278	354	472
	引き伸ばし率	3.82	3.15 (1.92)	3.45 (4.87)
奥利根	実績雨量	97	141	176
	PMP	247	331	425
	引き伸ばし率	2.54	2.34 (1.89)	2.41 (2.71)

()内の数値は12～24hr, あるいは24～72hrの雨量の引き伸ばし率を表す。

表 5.12 PMP に対する引き伸ばし率（豪雨 3）

(a) 現況 PMP に対する引き伸ばし率

流域		12hr	24hr	72hr
八斗島	実績雨量	63	103	122
	PMP	225	273	341
	引き伸ばし率	3.57	2.65 (1.21)	2.80 (3.59)
烏・神流川	実績雨量	66	103	117
	PMP	221	292	386
	引き伸ばし率	3.34	2.82 (1.90)	3.29 (6.81)
吾妻川	実績雨量	56	84	98
	PMP	200	259	336
	引き伸ばし率	3.59	3.08 (2.08)	3.44 (5.61)
奥利根	実績雨量	45	70	83
	PMP	175	236	300
	引き伸ばし率	3.85	3.35 (2.44)	3.63 (5.28)

()内の数値は12～24hr, あるいは24～72hrの雨量の引き伸ばし率を表す。

(b) 気候変動考慮 PMP に対する引き伸ばし率

流域		12hr	24hr	72hr
八斗島	実績雨量	63	103	122
	PMP	270	369	484
	引き伸ばし率	4.29	3.59 (2.47)	3.97 (6.07)
烏・神流川	実績雨量	66	103	117
	PMP	317	416	552
	引き伸ばし率	4.79	4.02 (2.65)	4.71 (9.86)
吾妻川	実績雨量	56	84	98
	PMP	278	354	472
	引き伸ばし率	5.00	4.21 (2.68)	4.83 (8.60)
奥利根	実績雨量	45	70	83
	PMP	247	331	425
	引き伸ばし率	5.43	4.70 (3.36)	5.15 (7.76)

()内の数値は12～24hr, あるいは24～72hrの雨量の引き伸ばし率を表す。

表 5.13 PMP に対する引き伸ばし率（豪雨 4）

(a) 現況 PMP に対する引き伸ばし率

流域		12hr	24hr	72hr
八斗島	実績雨量	86	141	181
	PMP	225	273	341
	引き伸ばし率	2.62	1.93 (0.88)	1.88 (1.71)
烏・神流川	実績雨量	74	95	107
	PMP	221	292	386
	引き伸ばし率	3.00	3.08 (3.35)	3.61 (7.83)
吾妻川	実績雨量	80	106	120
	PMP	200	259	336
	引き伸ばし率	2.49	2.44 (2.28)	2.80 (5.50)
奥利根	実績雨量	57	80	95
	PMP	175	236	300
	引き伸ばし率	3.06	2.97 (2.73)	3.16 (4.16)

()内の数値は12～24hr, あるいは24～72hrの雨量の引き伸ばし率を表す。

(b) 気候変動考慮 PMP に対する引き伸ばし率

流域		12hr	24hr	72hr
八斗島	実績雨量	86	141	181
	PMP	270	369	484
	引き伸ばし率	3.15	2.61 (1.79)	2.67 (2.88)
烏・神流川	実績雨量	74	95	107
	PMP	317	416	552
	引き伸ばし率	4.30	4.39 (4.67)	5.17 (11.32)
吾妻川	実績雨量	80	106	120
	PMP	278	354	472
	引き伸ばし率	3.47	3.34 (2.94)	3.93 (8.42)
奥利根	実績雨量	57	80	95
	PMP	247	331	425
	引き伸ばし率	4.32	4.16 (3.77)	4.48 (6.10)

()内の数値は12～24hr, あるいは24～72hrの雨量の引き伸ばし率を表す。

表 5.14 PMP に対する引き伸ばし率（豪雨 5）

(a) 現況 PMP に対する引き伸ばし率

流域		12hr	24hr	72hr
八斗島	実績雨量	70	77	188
	PMP	225	273	341
	引き伸ばし率	3.20	3.55 (7.29)	1.81 (0.61)
烏・神流川	実績雨量	67	124	233
	PMP	221	292	386
	引き伸ばし率	3.29	2.35 (1.24)	1.66 (0.87)
吾妻川	実績雨量	79	140	236
	PMP	200	259	336
	引き伸ばし率	2.53	1.85 (0.97)	1.42 (0.80)
奥利根	実績雨量	73	116	208
	PMP	175	236	300
	引き伸ばし率	2.40	2.03 (1.41)	1.44 (0.70)

()内の数値は12～24hr, あるいは24～72hrの雨量の引き伸ばし率を表す。

(b) 気候変動考慮 PMP に対する引き伸ばし率

流域		12hr	24hr	72hr
八斗島	実績雨量	70	77	188
	PMP	270	369	484
	引き伸ばし率	3.85	4.80 (14.84)	2.57 (1.03)
烏・神流川	実績雨量	67	124	233
	PMP	317	416	552
	引き伸ばし率	4.72	3.34 (1.73)	2.37 (1.26)
吾妻川	実績雨量	79	140	236
	PMP	278	354	472
	引き伸ばし率	3.51	2.53 (1.25)	2.00 (1.23)
奥利根	実績雨量	73	116	208
	PMP	247	331	425
	引き伸ばし率	3.39	2.85 (1.95)	2.04 (1.02)

()内の数値は12～24hr, あるいは24～72hrの雨量の引き伸ばし率を表す。

表 5.15 PMP に対する引き伸ばし率（豪雨 6）

(a) 現況 PMP に対する引き伸ばし率

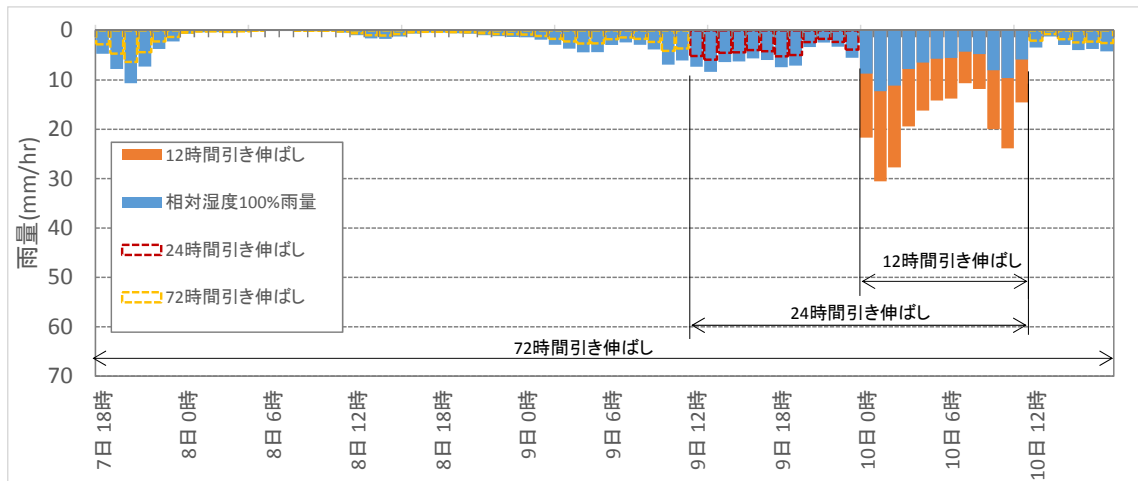
流域		12hr	24hr	72hr
八斗島	相対湿度100%雨量	167	229	292
	PMP	225	273	341
	引き伸ばし率	1.35	1.19 (0.78)	1.17 (1.09)
烏・神流川	相対湿度100%雨量	277	332	392
	PMP	221	292	386
	引き伸ばし率	0.80	0.88 (1.22)	0.98 (1.70)
吾妻川	相対湿度100%雨量	223	256	299
	PMP	200	259	336
	引き伸ばし率	0.90	1.01 (1.81)	1.12 (1.78)
奥利根	相対湿度100%雨量	236	273	316
	PMP	175	236	300
	引き伸ばし率	0.74	0.86 (1.64)	0.95 (1.48)

()内の数値は12～24hr, あるいは24～72hrの雨量の引き伸ばし率を表す。

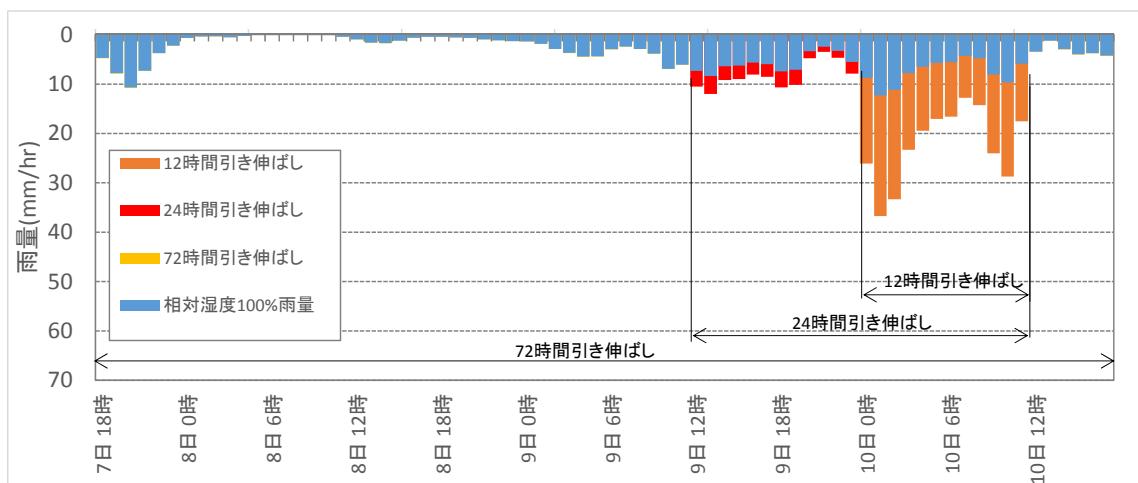
(b) 気候変動考慮 PMP に対する引き伸ばし率

流域		12hr	24hr	72hr
八斗島	相対湿度100%雨量	167	229	292
	PMP	270	369	484
	引き伸ばし率	1.62	1.61 (1.59)	1.66 (1.84)
烏・神流川	相対湿度100%雨量	277	332	392
	PMP	317	416	552
	引き伸ばし率	1.14	1.25 (1.70)	1.41 (2.45)
吾妻川	相対湿度100%雨量	223	256	299
	PMP	278	354	472
	引き伸ばし率	1.25	1.38 (2.33)	1.58 (2.72)
奥利根	相対湿度100%雨量	236	273	316
	PMP	247	331	425
	引き伸ばし率	1.05	1.21 (2.26)	1.34 (2.18)

()内の数値は12～24hr, あるいは24～72hrの雨量の引き伸ばし率を表す。

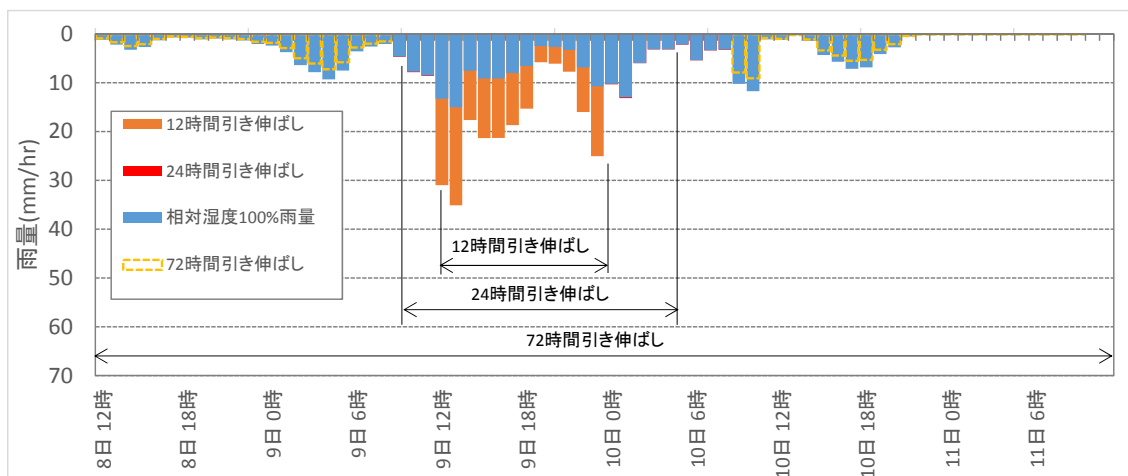


(a) 現況

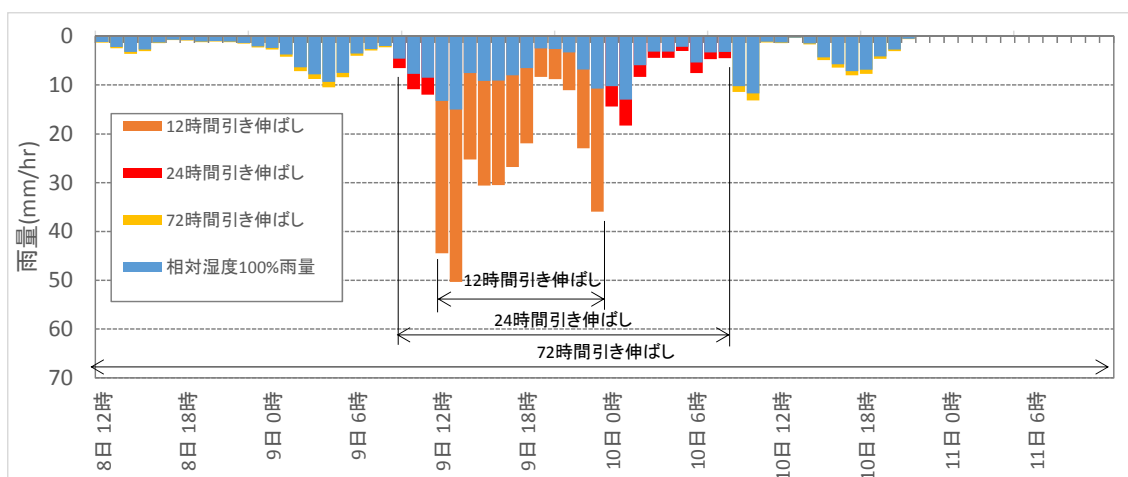


(b) 気候変動考慮

図 5.21 八斗島上流域における時間分布(豪雨 1)

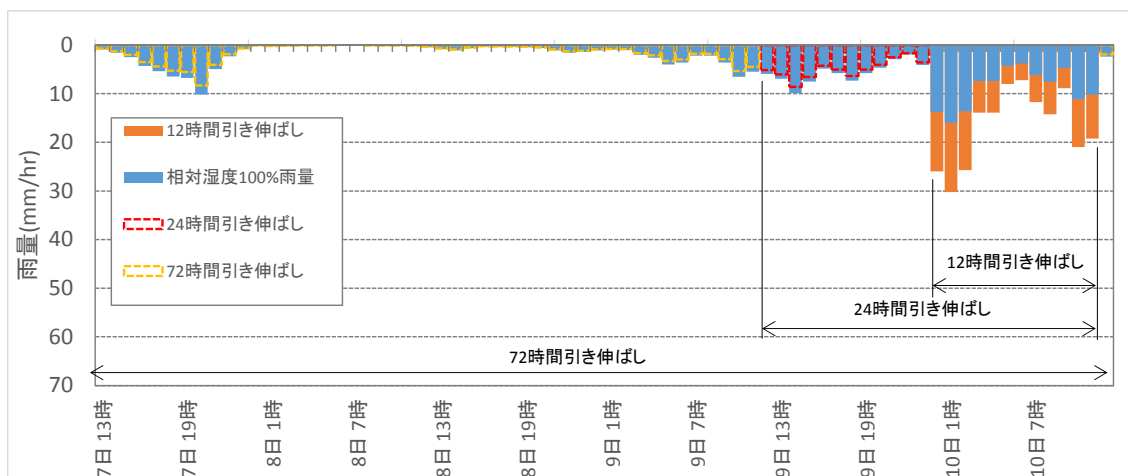


(a) 現況

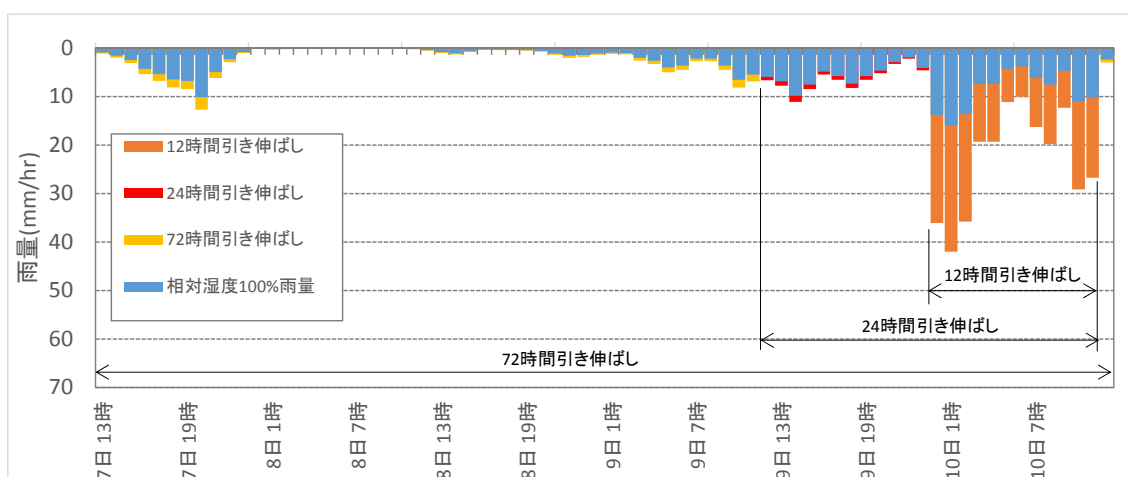


(b) 気候変動考慮

図 5.22 烏・神流川流域における時間分布(豪雨 1)

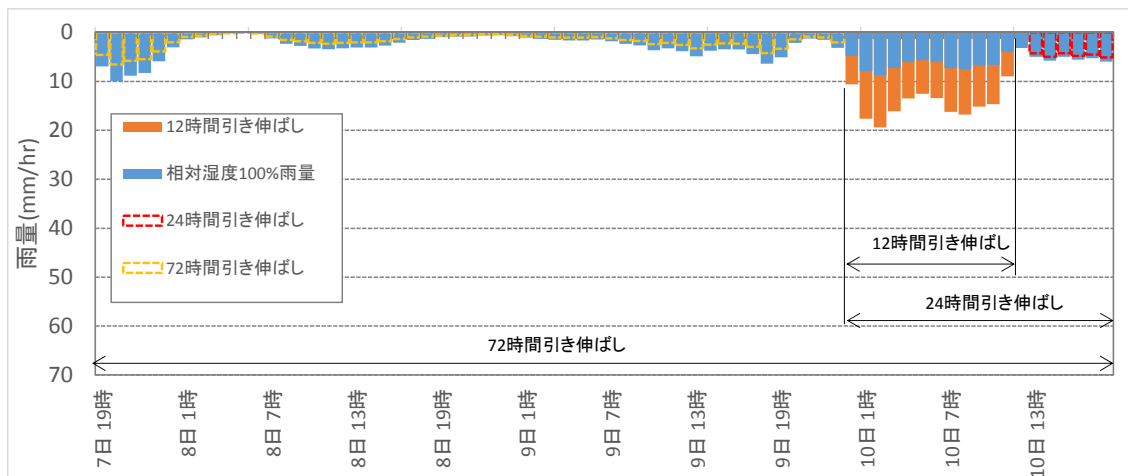


(a) 現況

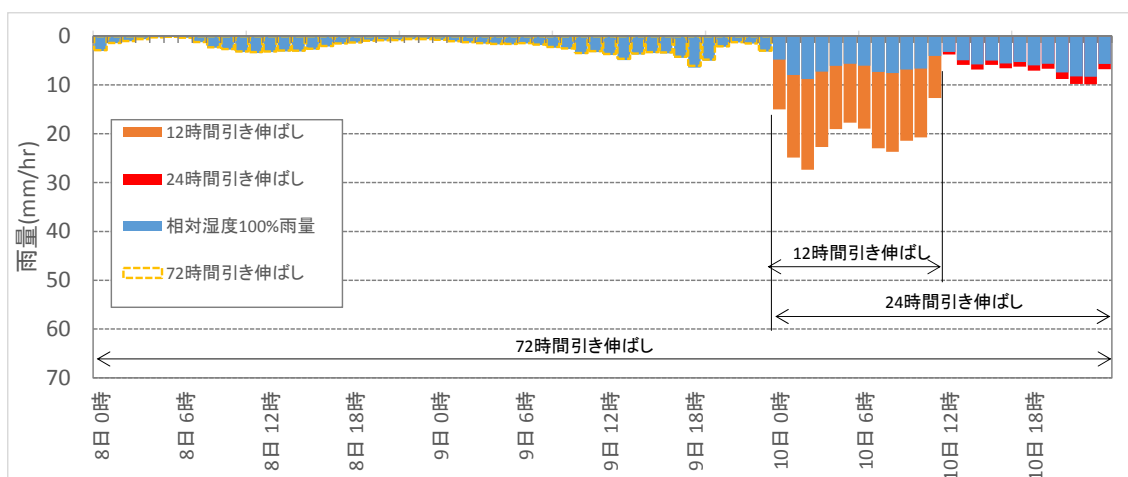


(b) 気候変動考慮

図 5.23 吾妻川流域における時間分布(豪雨 1)

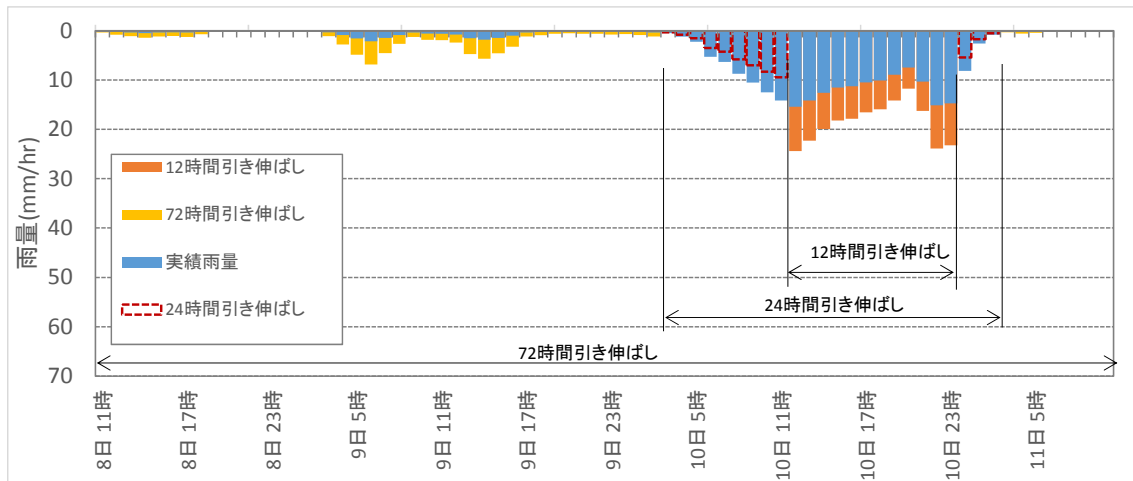


(a) 現況

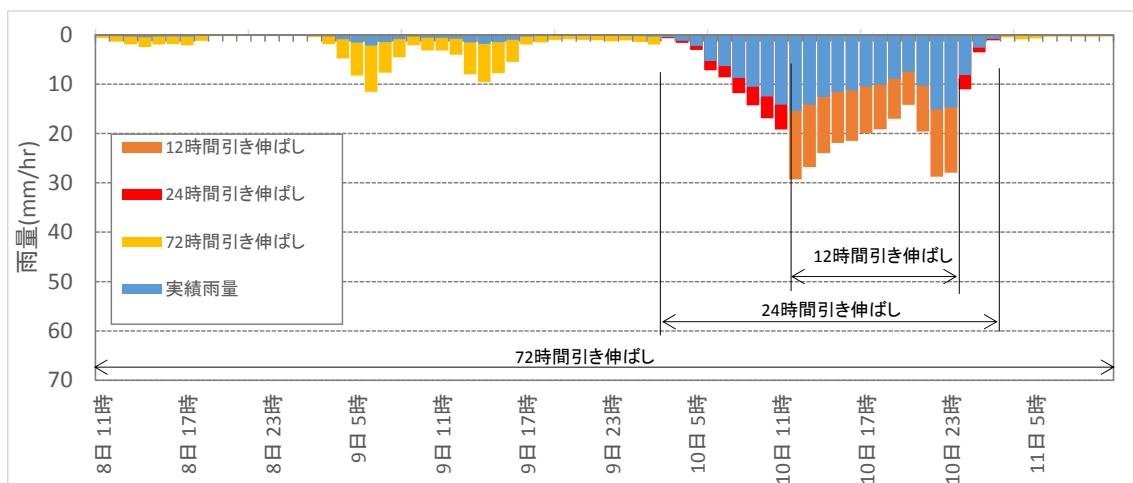


(b) 気候変動考慮

図 5.24 奥根流域における時間分布(豪雨 1)

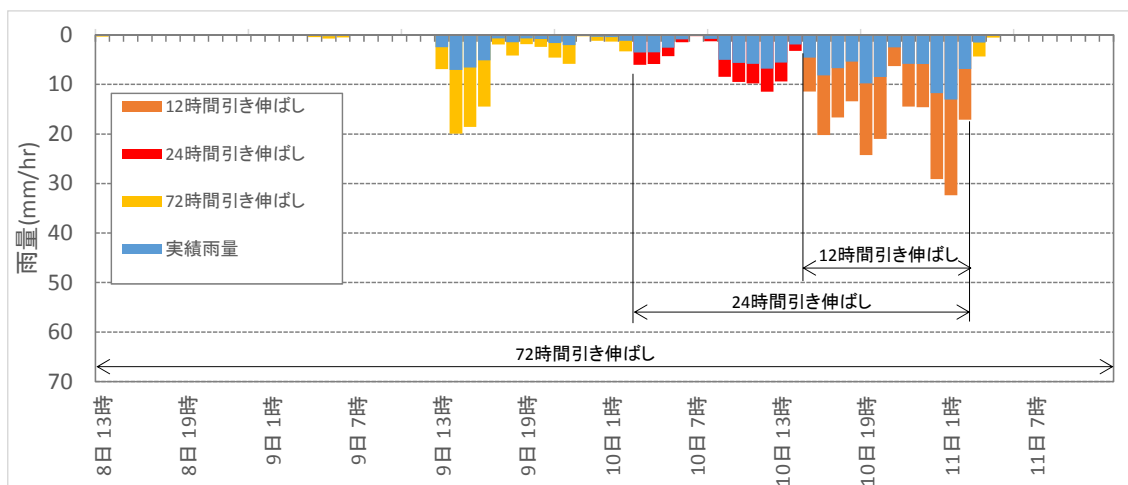


(a) 現況

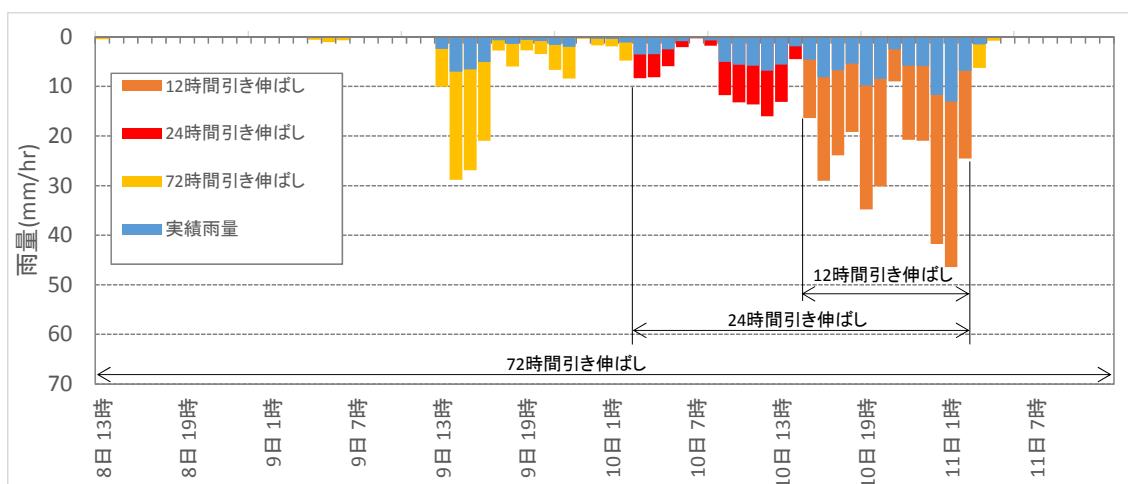


(b) 気候変動考慮

図 5.25 八斗島上流域における時間分布 (豪雨 2)

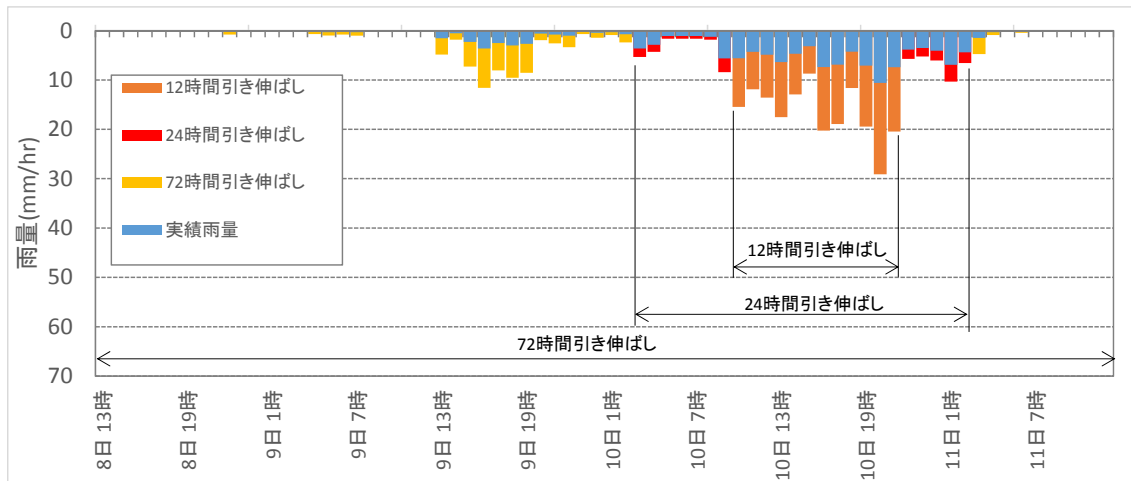


(a) 現況

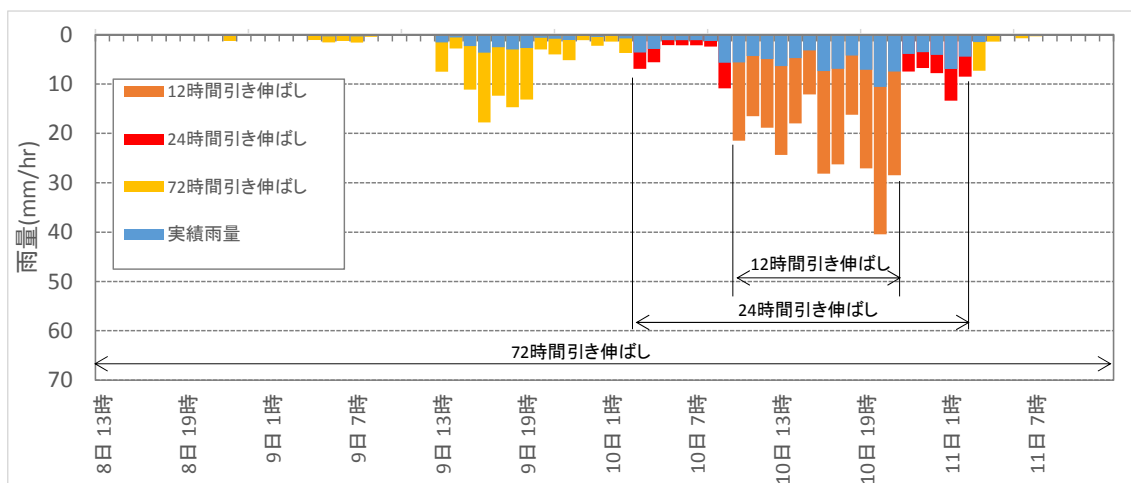


(b) 気候変動考慮

図 5.26 烏・神流川流域における時間分布(豪雨2)

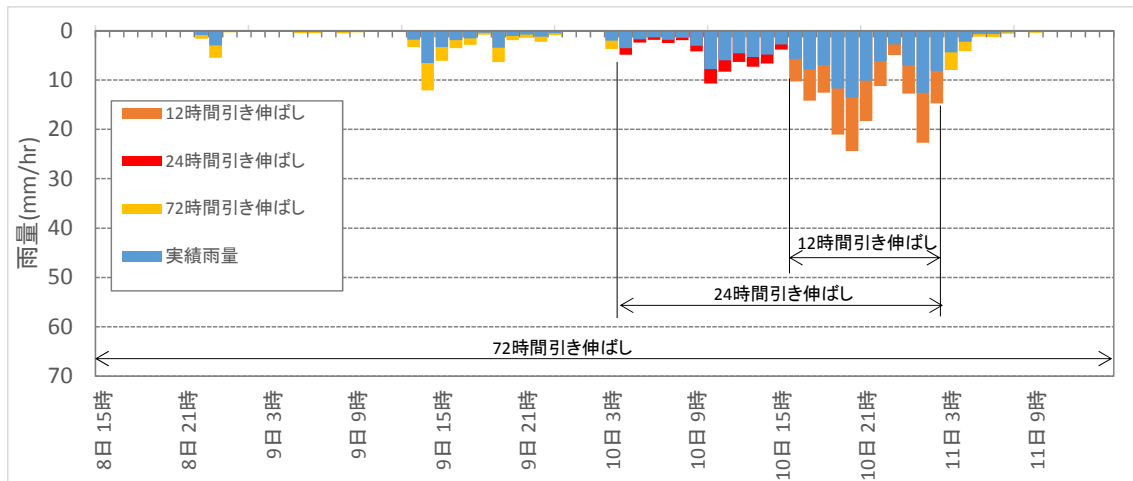


(a) 現況

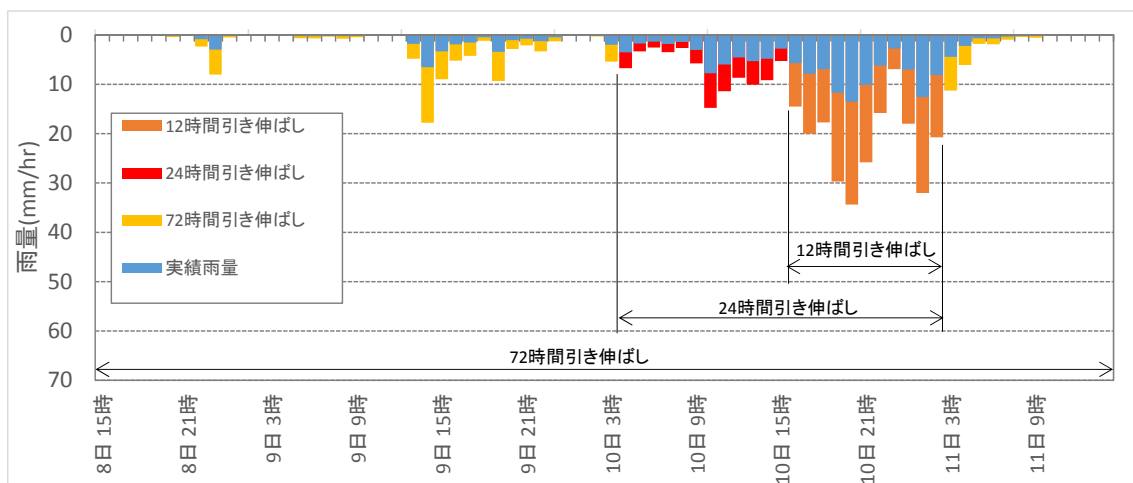


(b) 気候変動考慮

図 5.27 吾妻川流域における時間分布(豪雨 2)

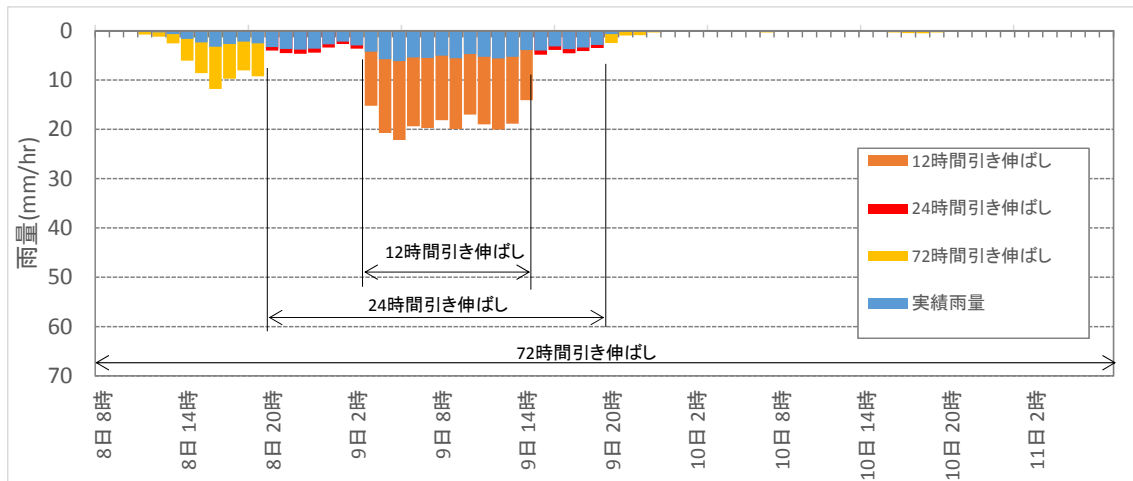


(a) 現況

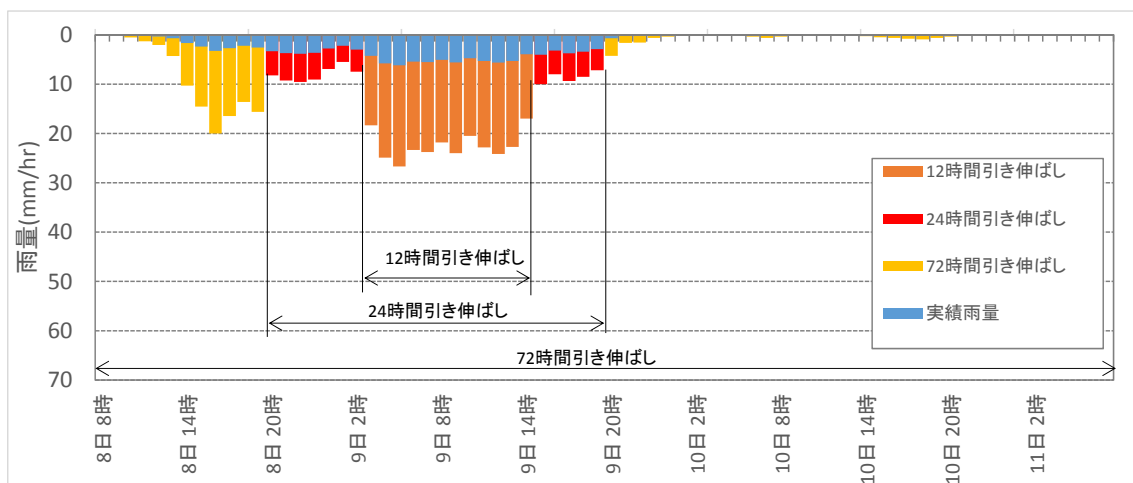


(b) 気候変動考慮

図 5.28 奥利根流域における時間分布(豪雨 2)

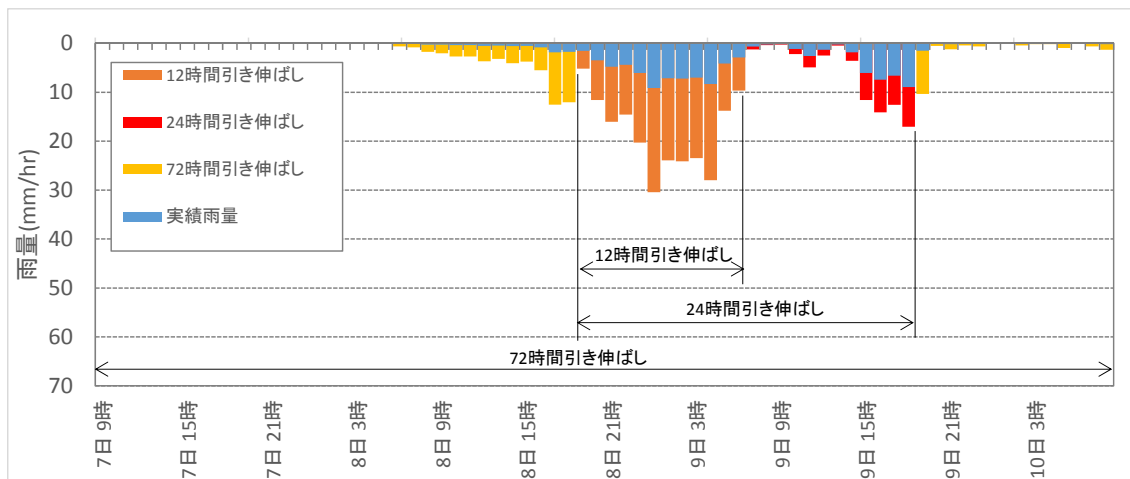


(a) 現況

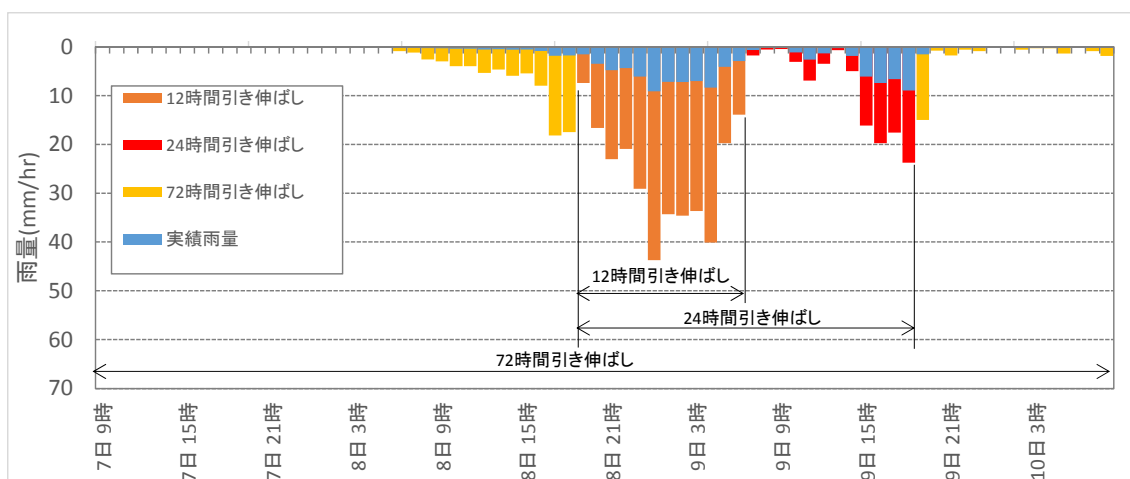


(b) 気候変動考慮

図 5.29 八斗島上流域における時間分布 (豪雨 3)

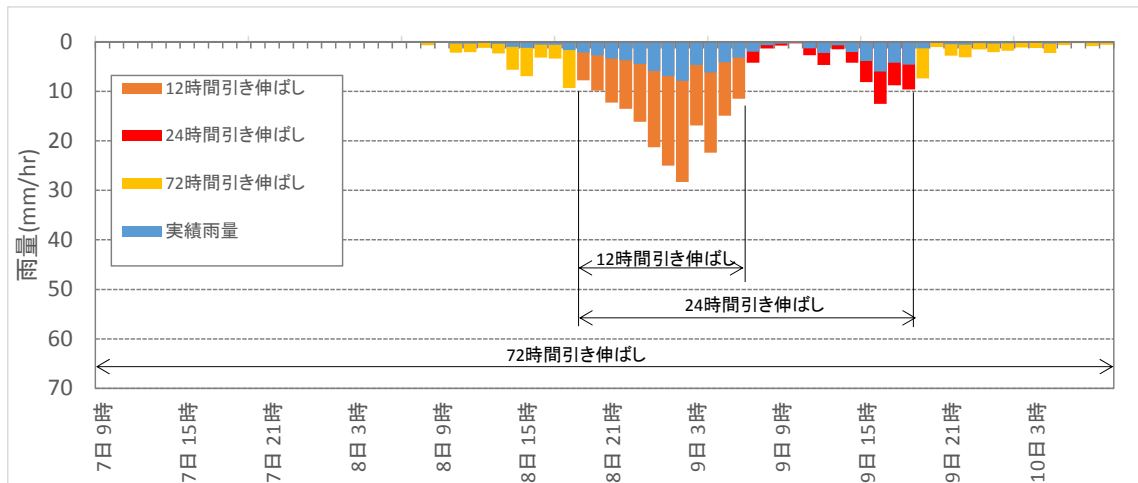


(a) 現況

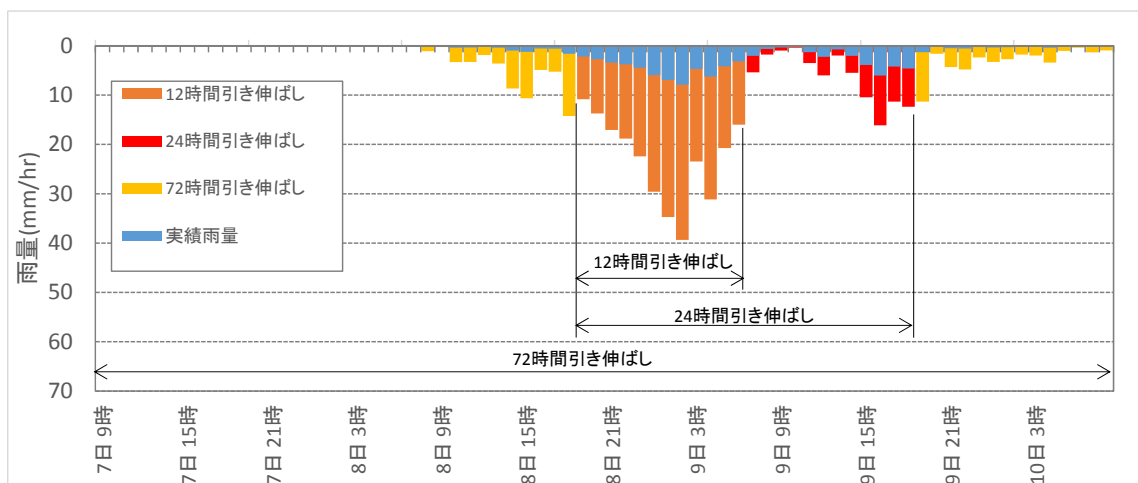


(b) 気候変動考慮

図 5.30 烏・神流川流域における時間分布(豪雨3)

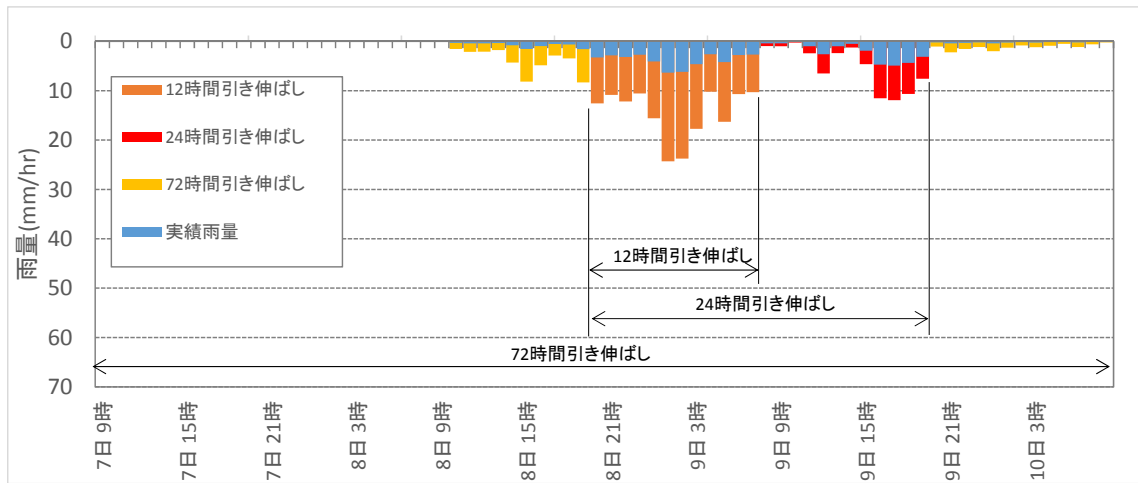


(a) 現況

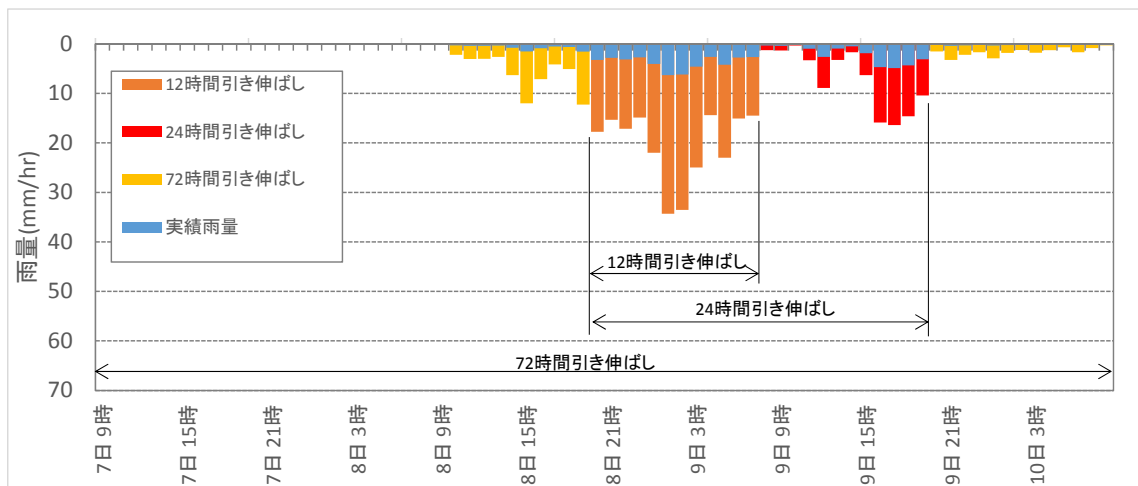


(b) 気候変動考慮

図 5.31 吾妻川流域における時間分布(豪雨 3)

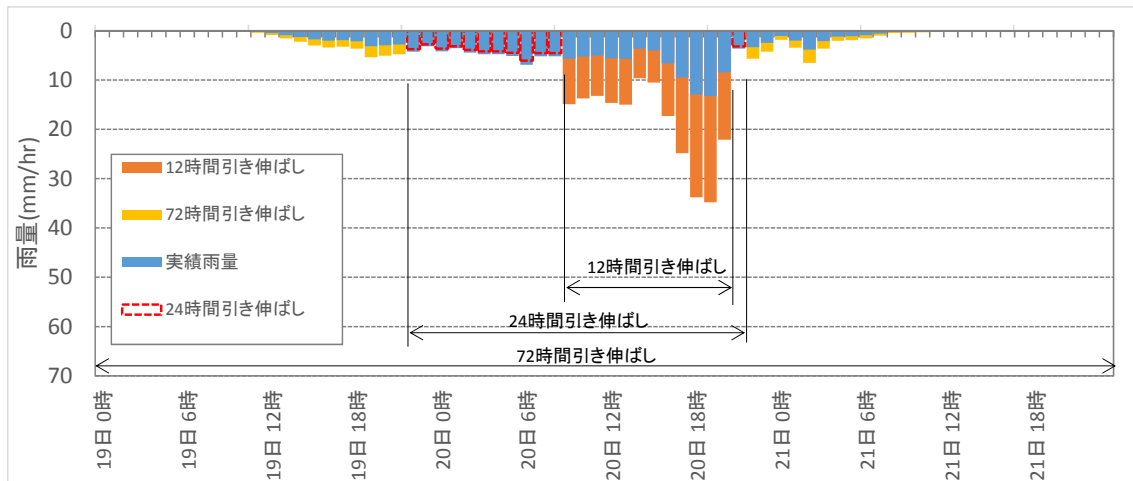


(a) 現況

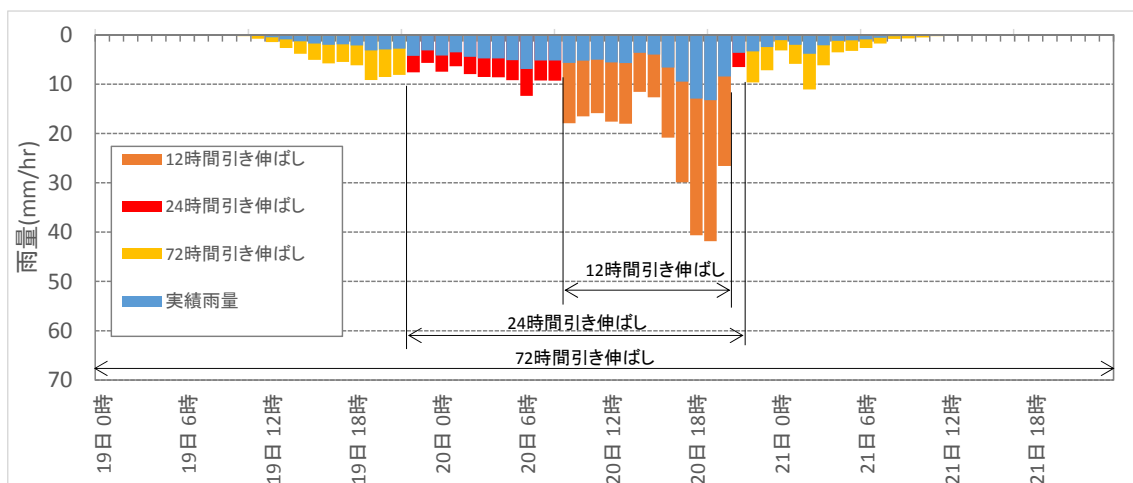


(b) 気候変動考慮

図 5.32 奥利根流域における時間分布(豪雨3)

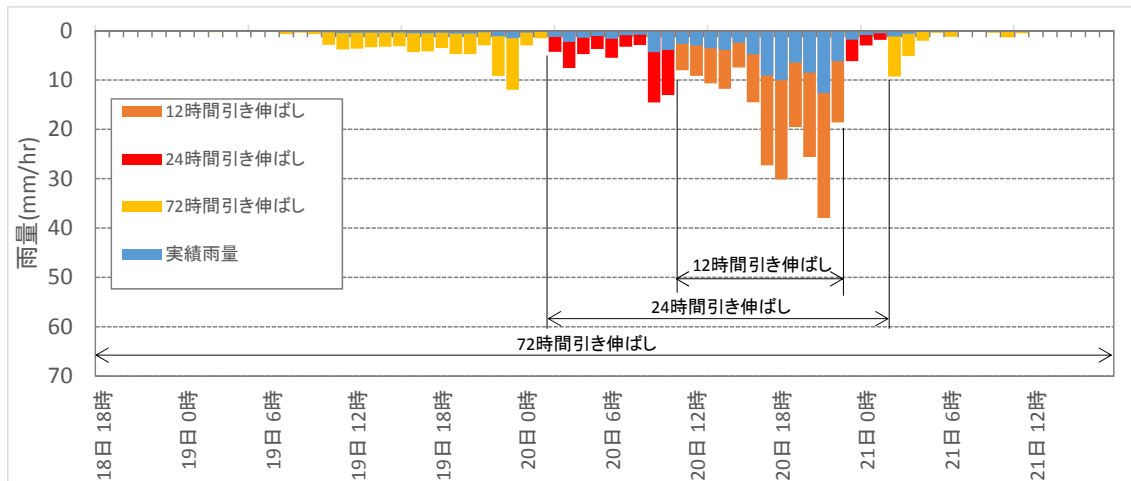


(a) 現況

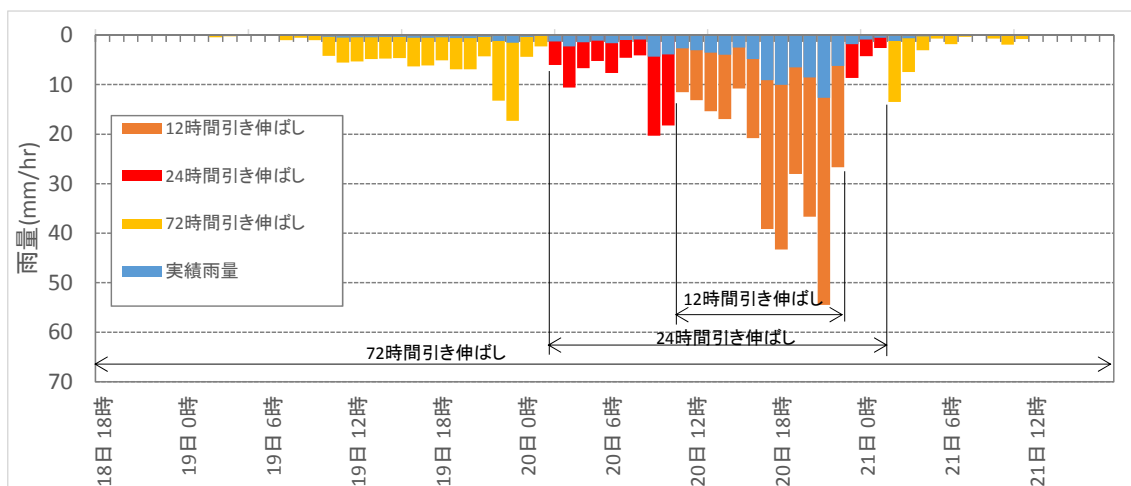


(b) 気候変動考慮

図 5.33 八斗島上流域における時間分布 (豪雨 4)

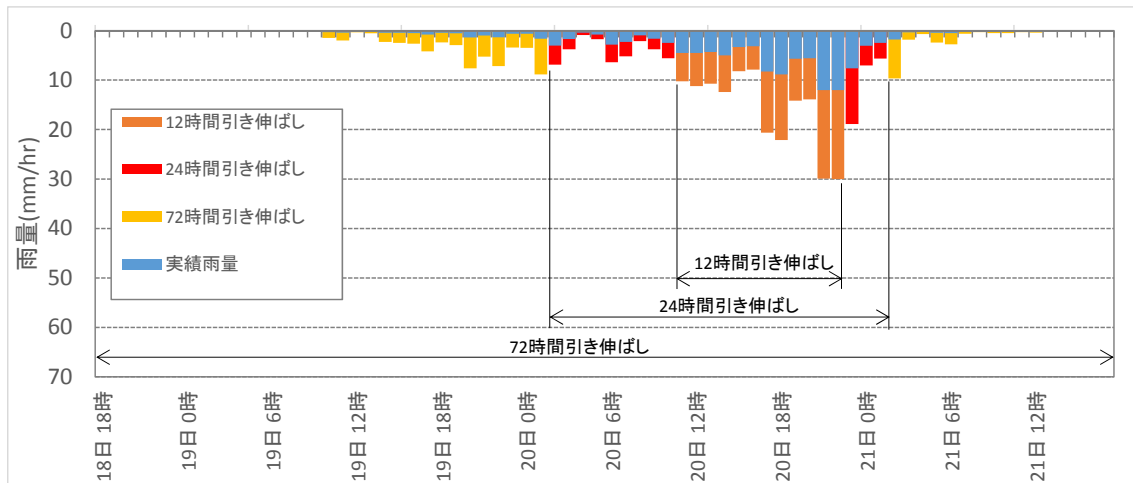


(a) 現況

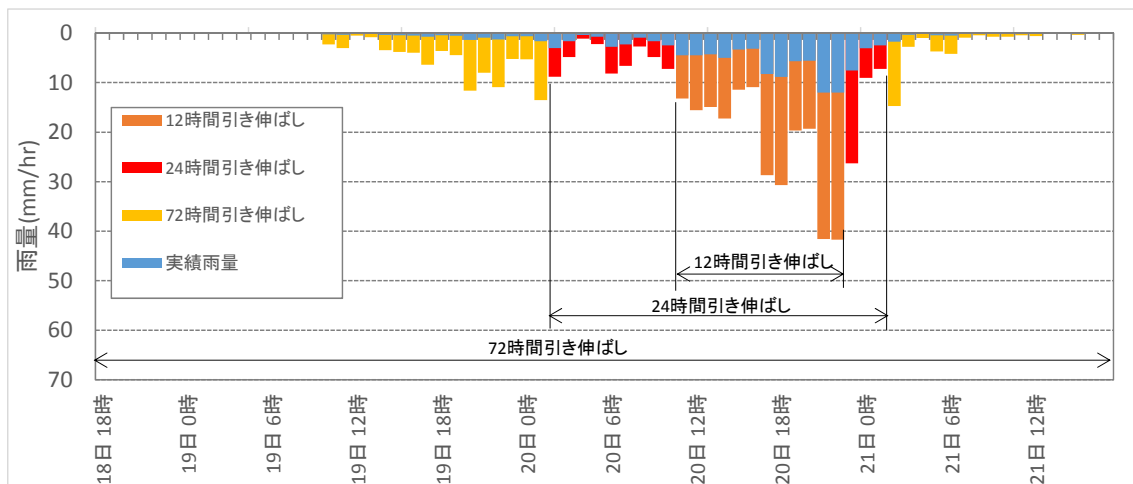


(b) 気候変動考慮

図 5.34 烏・神流川流域における時間分布(豪雨 4)

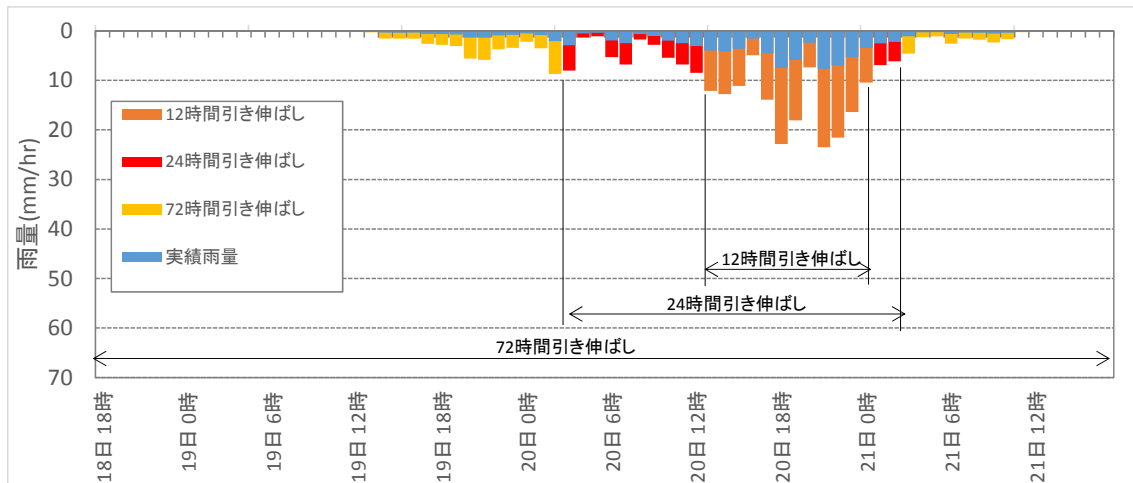


(a) 現況

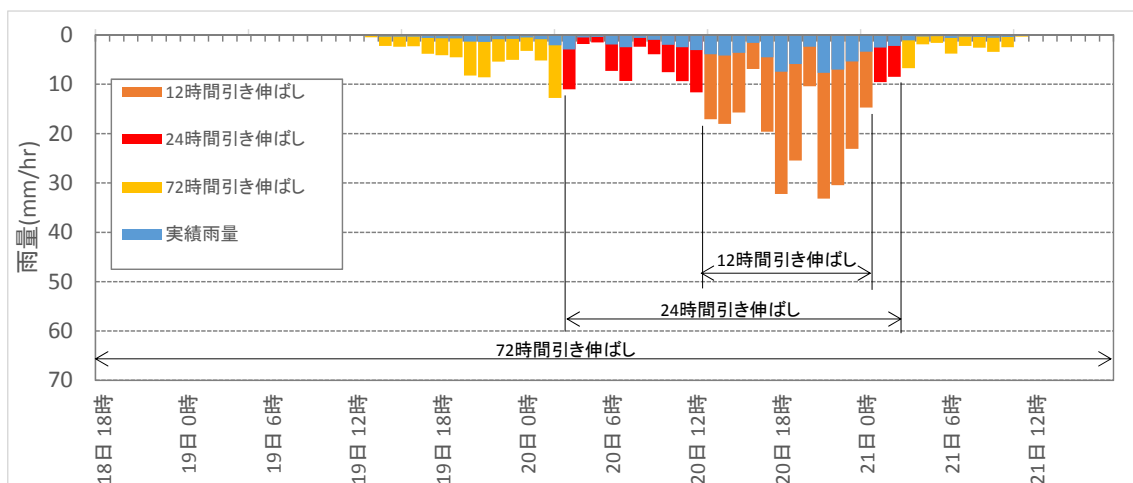


(b) 気候変動考慮

図 5.35 吾妻川流域における PMP 時間分布 (豪雨 4)

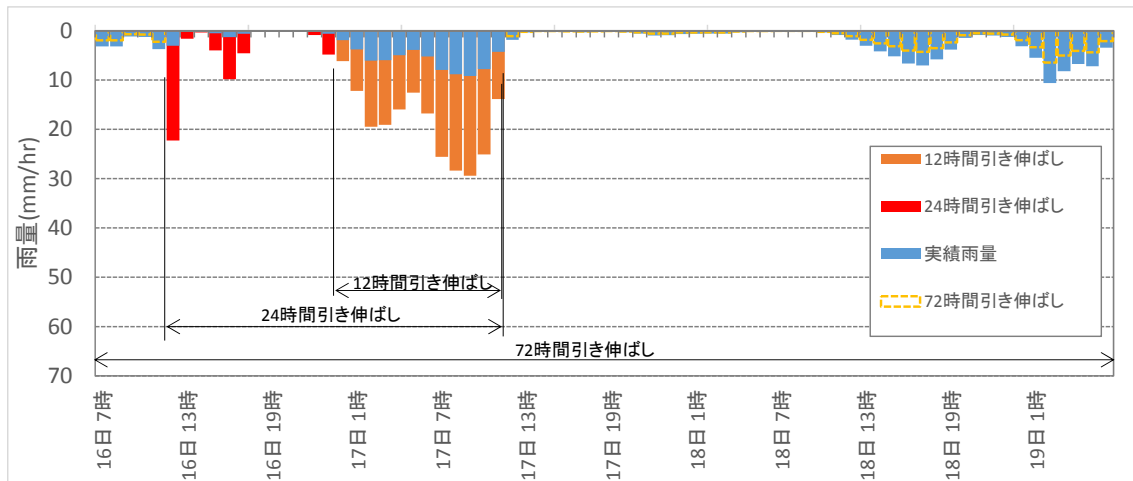


(a) 現況

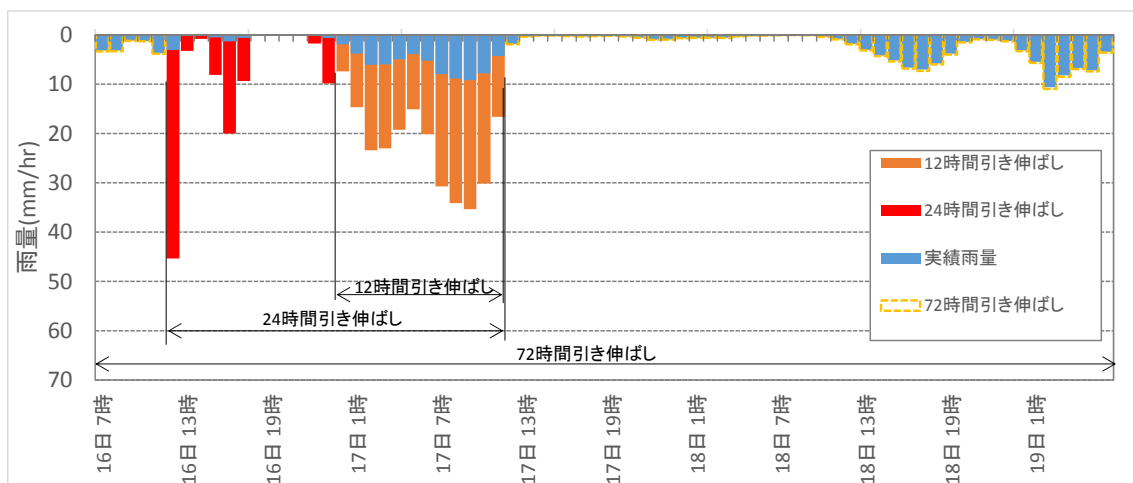


(b) 気候変動考慮

図 5.36 奥利根流域における時間分布(豪雨 4)

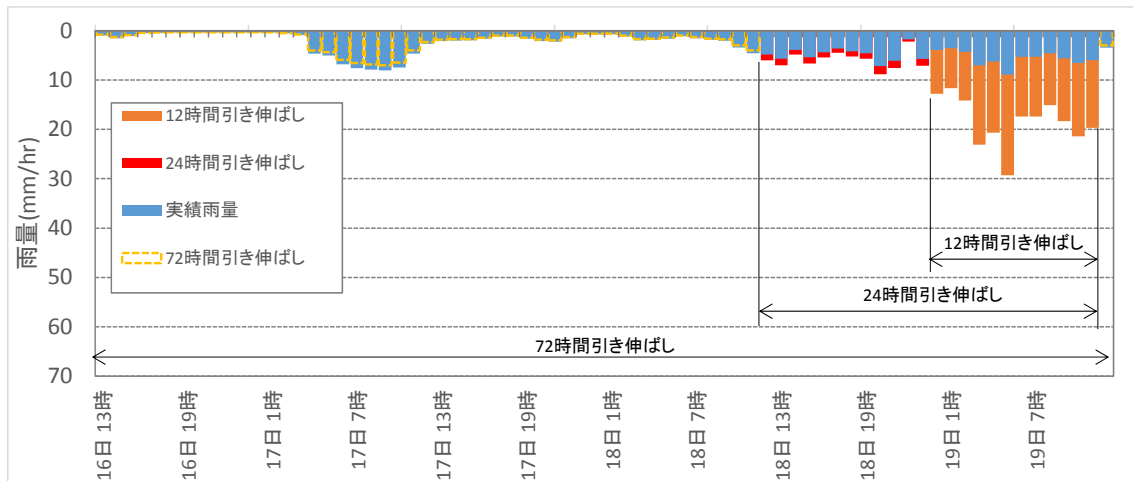


(a) 現況

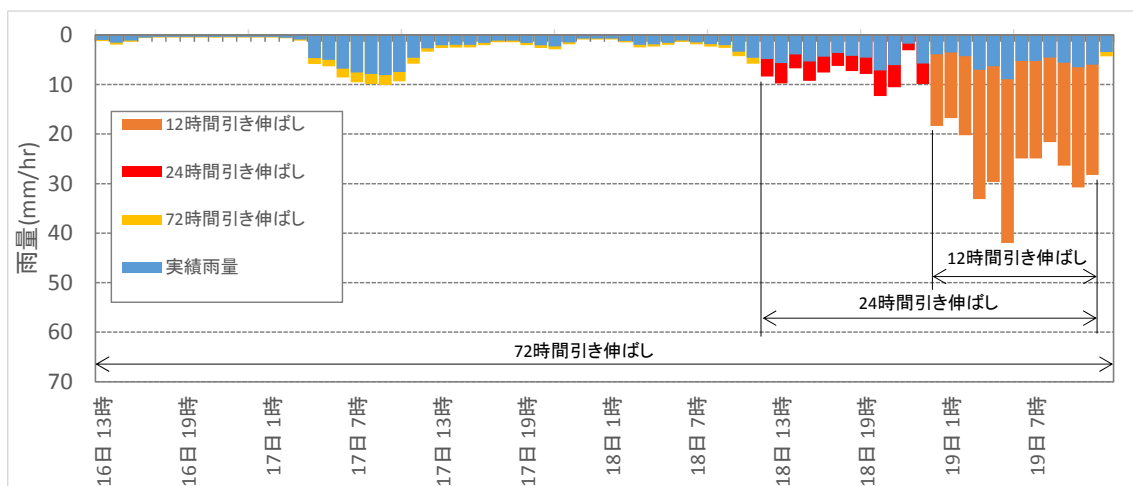


(b) 気候変動考慮

図 5.37 八斗島上流域における時間分布 (豪雨 5)

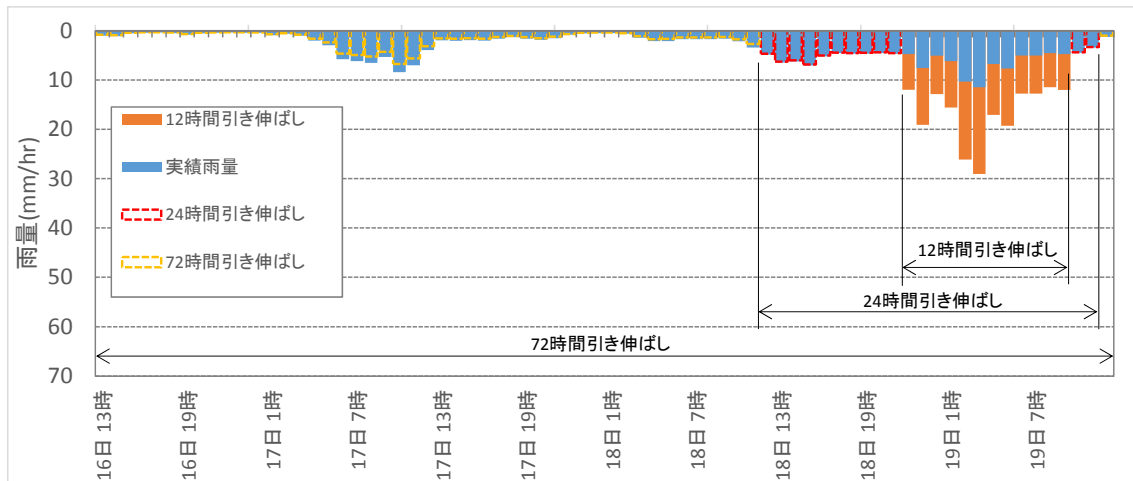


(a) 現況

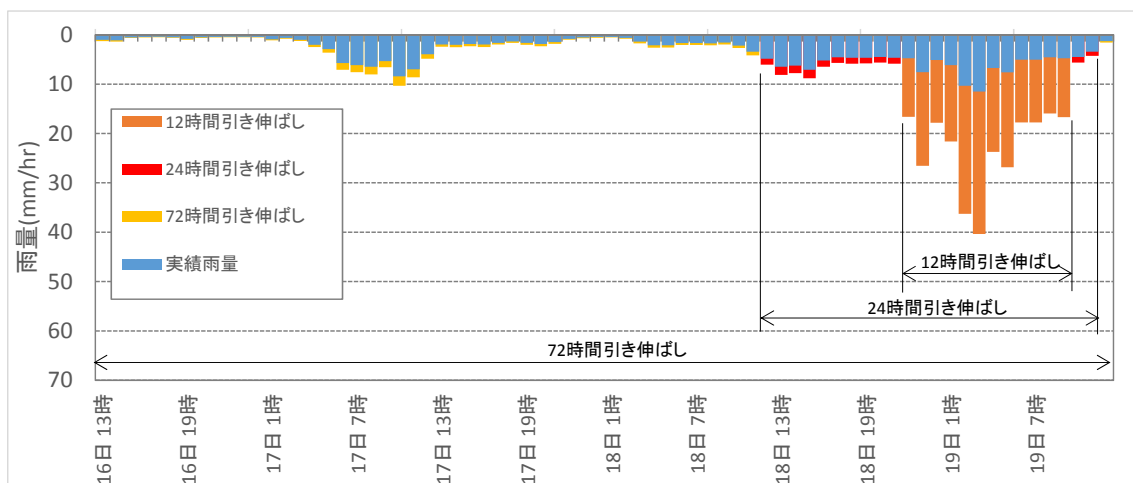


(b) 気候変動考慮

図 5.38 烏・神流川流域における時間分布(豪雨5)

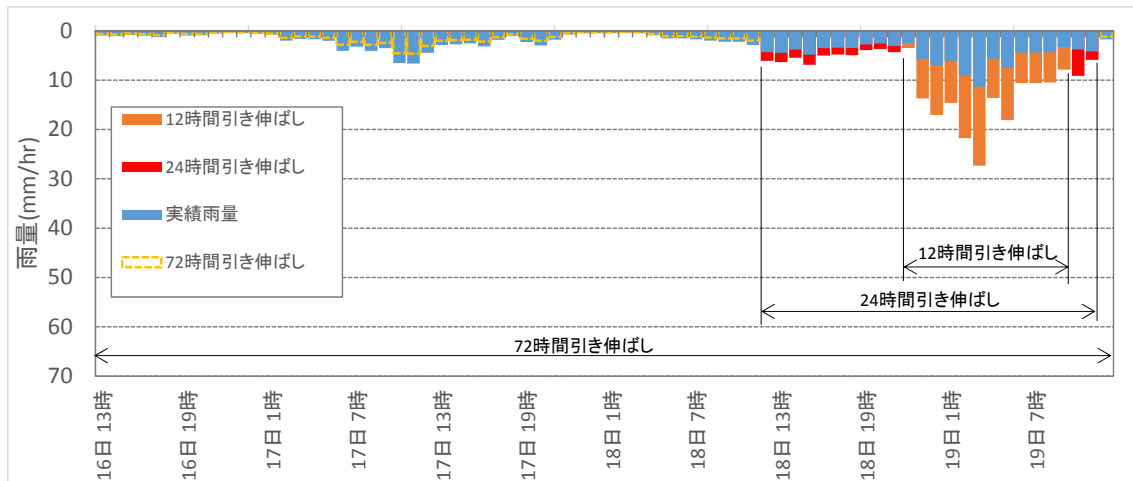


(a) 現況

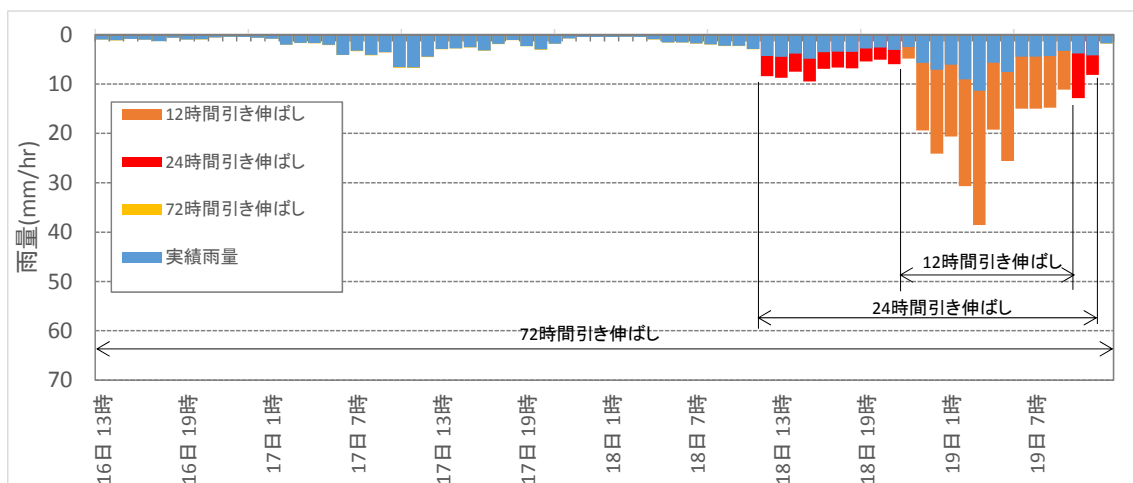


(b) 気候変動考慮

図 5.39 吾妻川流域における時間分布(豪雨 5)

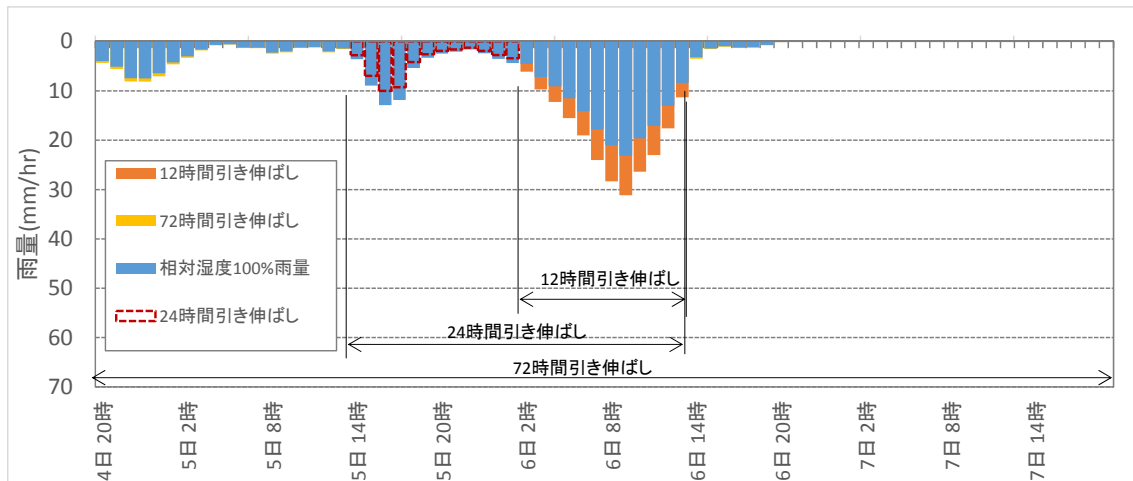


(a) 現況

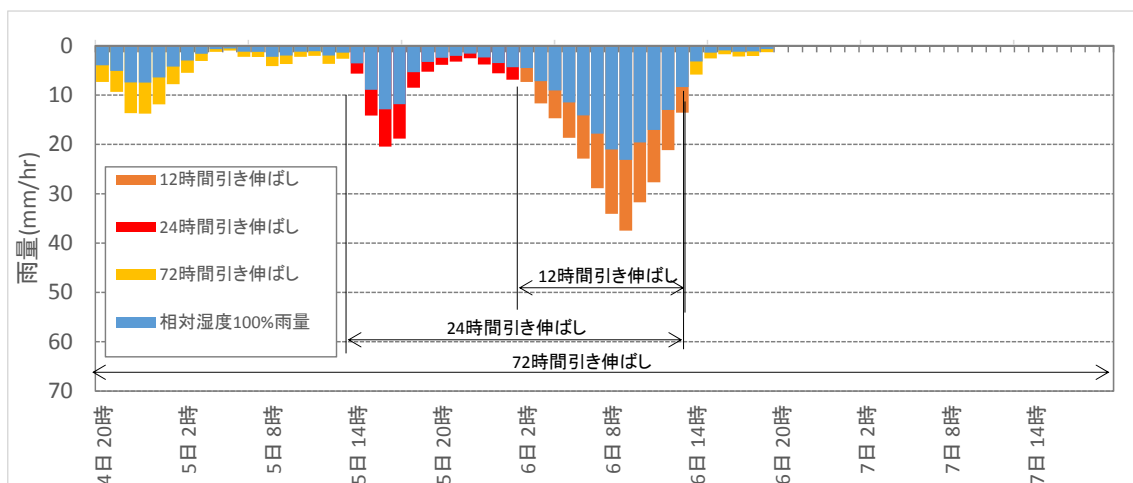


(b) 気候変動考慮

図 5.40 奥利根流域における時間分布(豪雨 5)

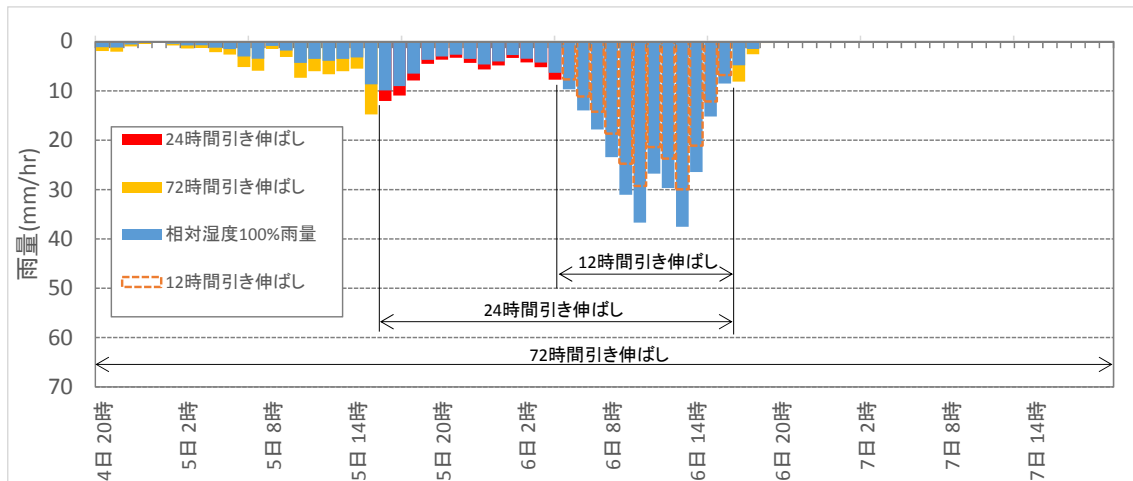


(a) 観況

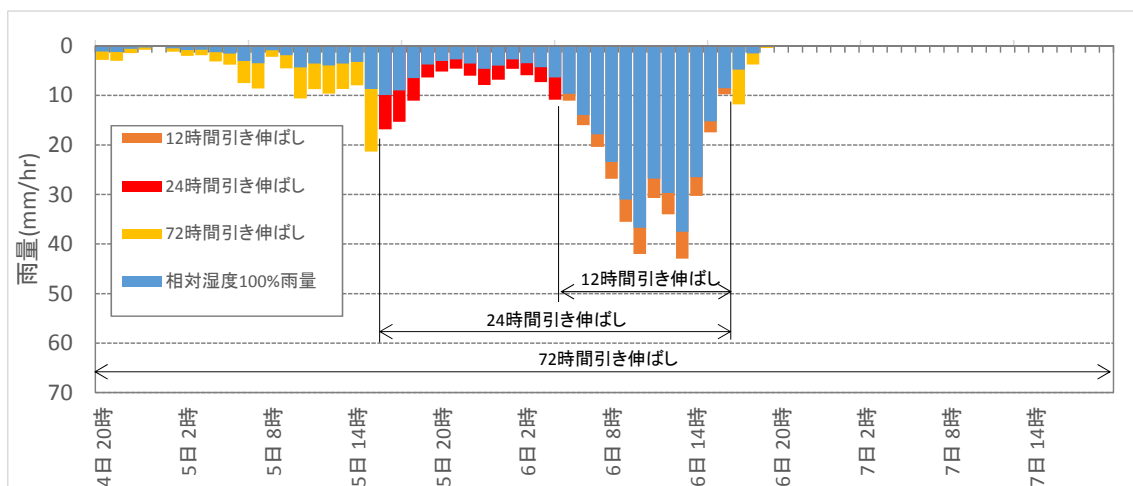


(b) 気候変動考慮

図 5.41 八斗島上流域における時間分布(豪雨6)

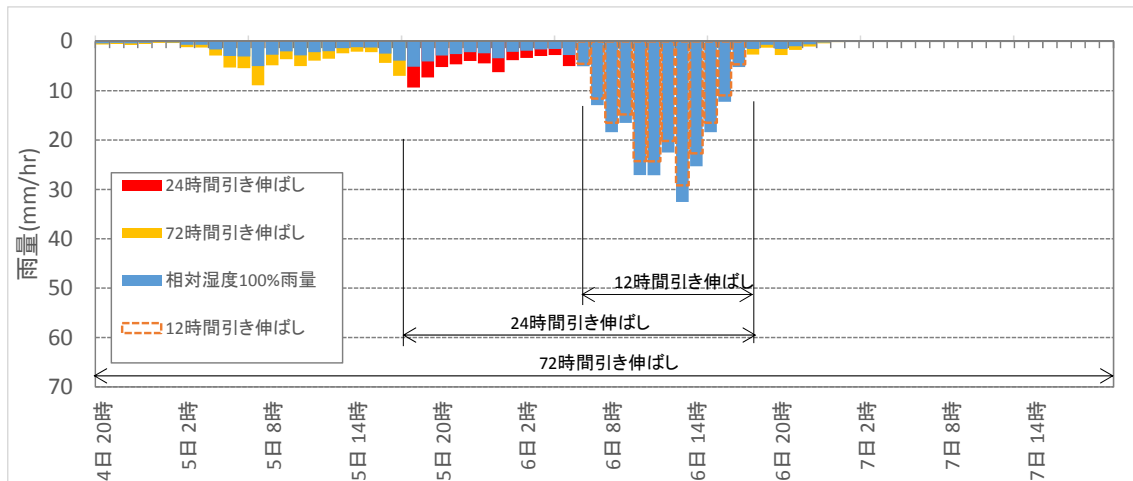


(a) 現況

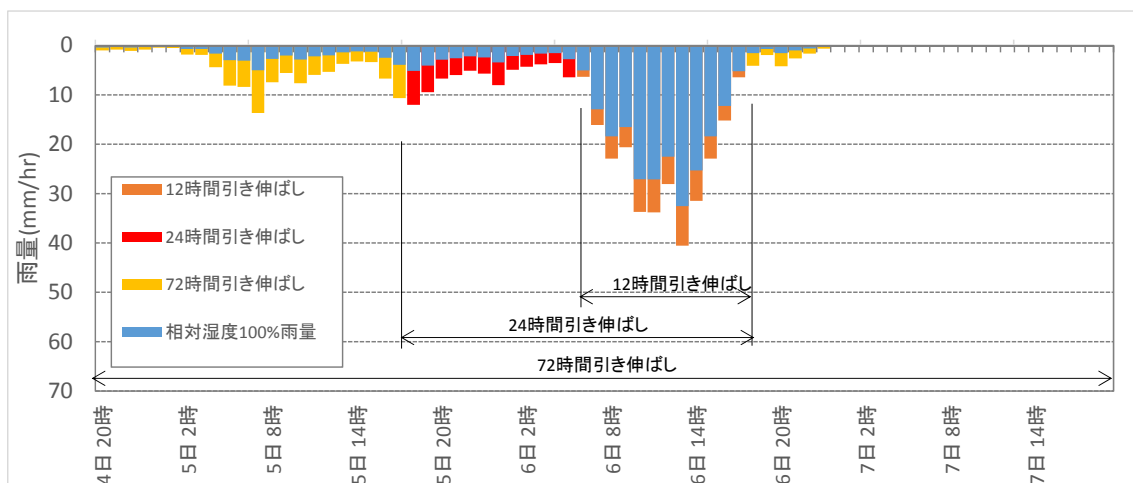


(b) 気候変動考慮

図 5.42 烏・神流川流域における時間分布(豪雨 6)

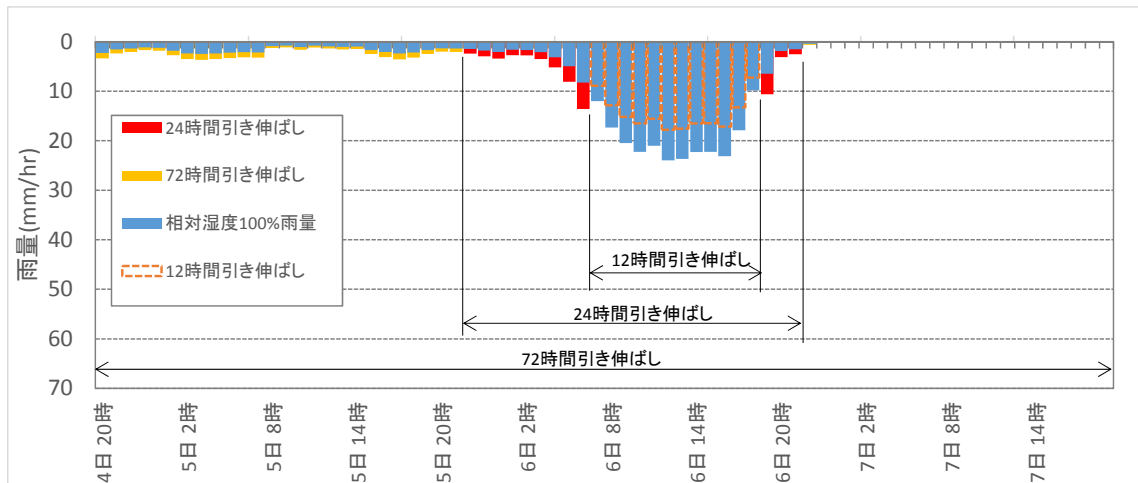


(a) 現況

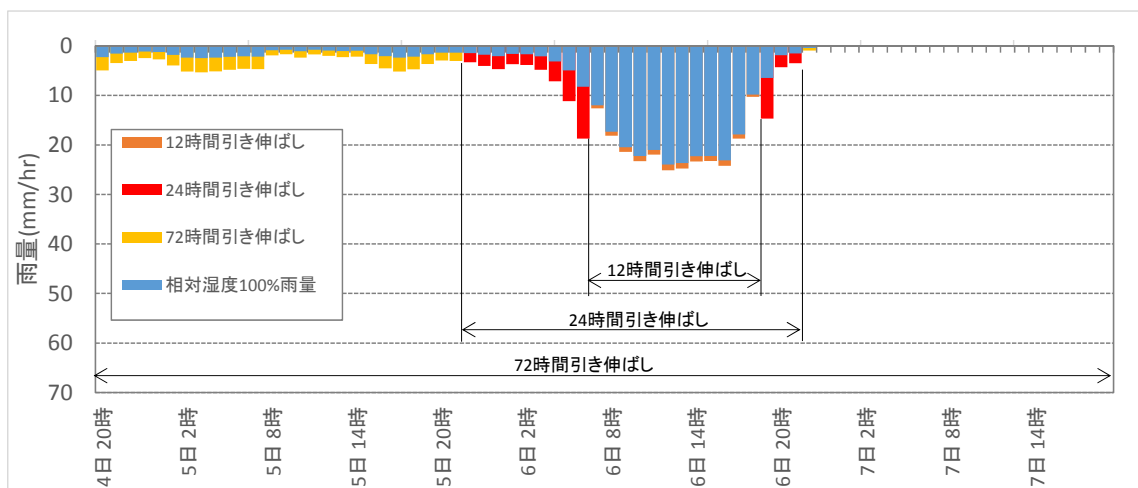


(b) 気候変動考慮

図 5.43 吾妻川流域における時間分布(豪雨 6)



(a) 現況



(b) 気候変動考慮

図 5.44 奥利根流域における時間分布(豪雨 6)

5.8 結語

第5章においては、前橋地上観測所における長期データから地上における過去最大水蒸気フラックスを抽出した。次に、利根川流域の主要洪水における降雨量と相関の高い気圧面の水蒸気フラックスの地上観測所の値との関係を作成した。以上の結果から、降雨継続時間毎、八斗島および小流域毎のPMPの推定を行った、PMPの推定結果と降雨成因の気象条件の変化による時系列変化特性を踏まえて降雨の時空間分布の設定を行った。さらに、排出シナリオRCP8.5の気候変動予測値から気候変動を考慮したPMPを設定した。第5章で得られた主な結果は以下のとおりである、

- (1) 過去最大の水蒸気フラックスから推定される最大雨量は、72時間雨量について341mmとなり、カスリン台風時の雨量を越える規模となった。また12時間雨量、24時間雨量についてはそれぞれ225mm、273mmとなっており相対湿度を変化させた気象モデルWRF計算結果の最大降雨量程度となっている。また、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分かった。
- (2) 降雨の時空間分布の設定に関しては、降雨量と最も相関の高い水蒸気フラックスの気圧面と継続時間に対して降雨継続時間毎の雨量に不整合が生じないように、PMPとその時空間分布を設定する手法を提案した。12, 24, 72時間PMP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おり実績最大雨量と同様な傾向を示している。一方、実績降雨に対する増加率は吾妻川流域および奥利根川流域が烏・神流川流域に対して大きくなる結果となった。
- (3) 気候変動を考慮したPMPは、Kain-Fritschスキーム(KF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)において水蒸気フラックスが最大となり、72時間雨量について496mm。また12時間雨量、24時間雨量についてはそれぞれ274mm、366mmとなった。

第5章で得られたPMPとその時空間分布を用いて、第6章において可能最大洪水の推定を行う。

第 5 章の参考文献

- 1) 国土交通省 水管理・国土保全局:利根川河川整備基本方針資料, 2006.
- 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, 55(B), pp.9-14, 2012.

第6章 可能最大洪水(PMF)の推定

6.1 概説

第6章においては、第5章において検討を行った **PMP** と時空間分布が河川計画の直接の外力としての流量にどのような影響を及ぼすか流出計算を実施することにより可能最大洪水(PMF)の検討を行う。

流出計算手法に関しては、利根川の河川整備基本方針に用いられている貯留関数法による流出計算モデルを用いる。流出計算条件は基本方針条件と整合をはかり、降雨量と時空間分布の違いによる流量の比較を行う。

流出計算ケースは現況ケースに関しては、第5章で作成した時空間分布のを基本として時空間に分布の違いが流量に与える影響を検討する。気候変動を考慮したケースにおいても気候変動を考慮した **PMP** に対して流出計算を行うことにより、現況条件での可能最大洪水との比較を示すことにより気候変動が可能最大洪水に与える影響を明らかにする。

6.2 PMF の推定手法

PMP の推定は、利根川河川整備基本方針における流量算定に用いられている有効雨量の評価を f-R 法とした貯留関数法を用いて計算を行う。すなわち、利根川水系の基本高水のピーク流量である八斗島基準地点 $22,000\text{m}^3/\text{s}$ の算出根拠となっている条件である。流域分割図、および流出モデル図を図 6.1、および図 6.2 に示す。

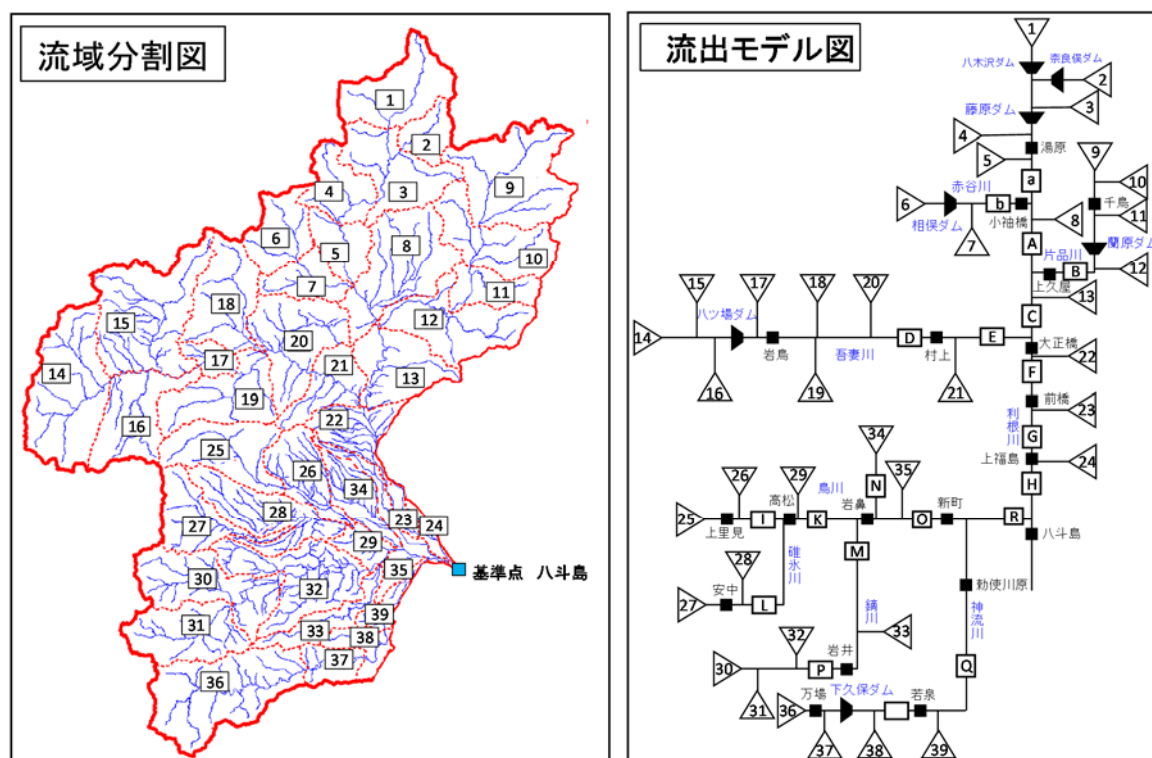


図 6.1 流域分割図，および流出計算モデル図

計算に用いられているパラメータは表 6.1 に示す日本学術会議における公開資料に示されている値を用いている。これらの流域定数は、八斗島上流域の 39 の小流域を奥利根流域、吾妻川流域、烏川流域、神流川流域の 4 流域について流域定数の分けて設定が行われている。

表 6.1 奥利根流域、吾妻流域、烏川流域、神流川流域において検証を行った、カスリン台風の基本高水のピーク流量 22,000m³/s の再現定数

流域定数										河道定数			
流域 No.	流域面積	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		開始基底流量	河道 No.	K	P	遅滞時間
	A (km ²)	f1	Rsa (mm)	fsa	R0 (mm)	TI (分)	k	p	Qb1 (m ³ /s)				TI (時間)
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
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				
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				
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				
									247.3				

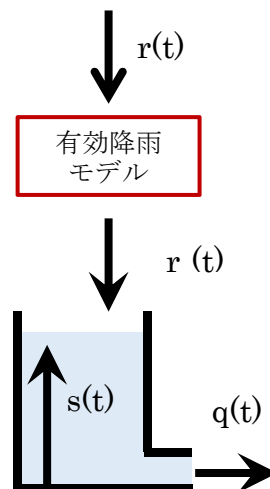


図 6.2 流域からの流出モデル

(1) 基礎式

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、次のとおりである。

1) 流域の基礎式

$$\begin{aligned}\frac{ds}{dt} &= f_{(t)} \cdot r_{(t)} - q_{(t+T_l)} \\ S_{(t)} &= K \cdot q_{(t+T_l)}^P \\ q_{(t)} &= \frac{3.6 \cdot Q_{(t)}}{A}\end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned}\sum r_{(t)} &\leq R_0 \text{ の場合, } f_{(t)} = 0.0 \\ R_0 < \sum r_{(t)} &\leq R_0 + R_{sa} \text{ の場合, } f_{(t)} = f_1 \\ \sum r_{(t)} &> R_0 + R_{sa} \text{ の場合, } f_{(t)} = 1.0\end{aligned}$$

ここで、

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

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。

$$Q_{ca(t)} = \frac{q_{(t)} \cdot A}{3.6} + Q_{b(t)}$$

ここで、 $S_{(t)}$ ：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 ：定数、 P ：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

$$\begin{aligned}S_{l(t)} &= K \cdot Q_{l(t)}^P - T_l \cdot Q_{l(t)} \\ \frac{dS_{l(t)}}{dt} &= l_{(t)} - Q_{l(t)} \\ Q_{l(t)} &= Q_{(t+T_l)}\end{aligned}$$

ここで、 $S_{l(t)}$ ：みかけの貯留量【(m³/s)・hr】、 $Q_{l(t)}$ ：遅れ時間 T_l を考慮した流出量【m³/s】、 $Q_{(t)}$ ：流出量【m³/s】、 $l_{(t)}$ ：流入量【m³/s】、 T_l ：遅滞時間【hr】、 K ：定数、 P ：定数【無次元】である。

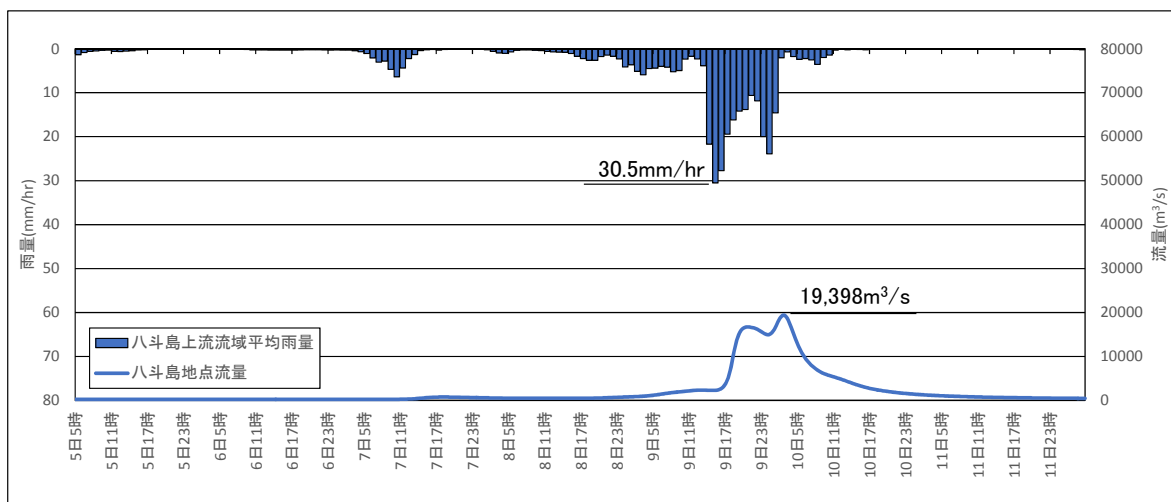
6.3 PMF の推定結果

6.3.1 現況での PMF

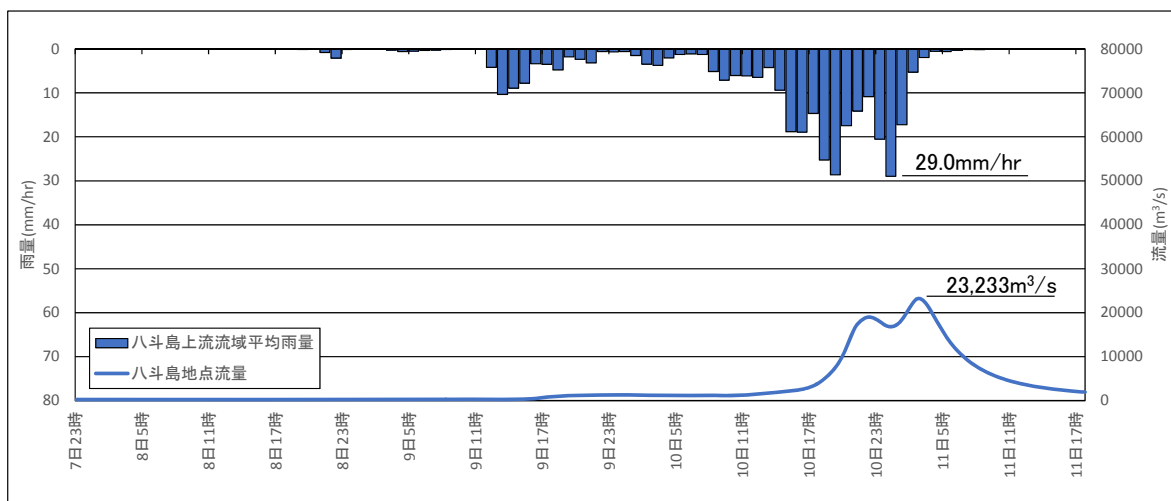
第5章で設定した現況 PMP と時空間分布を用いて、前節において示した手法により流出計算を行った八斗島地点におけるピーク流量の算定結果を表 6.2 に、流量ハイドログラフを図 6.3(1)～(2)に示す。この結果から、検討対象6豪雨のうち豪雨2、豪雨4および豪雨6の3豪雨が利根川河川整備基本方針における基本高水のピーク流量 $22,000\text{m}^3/\text{s}$ を越える規模となり、豪雨6が約 $26,000\text{m}^3/\text{s}$ と最大となることが分かった。

表 6.2 現況での八斗島地点ピーク流量

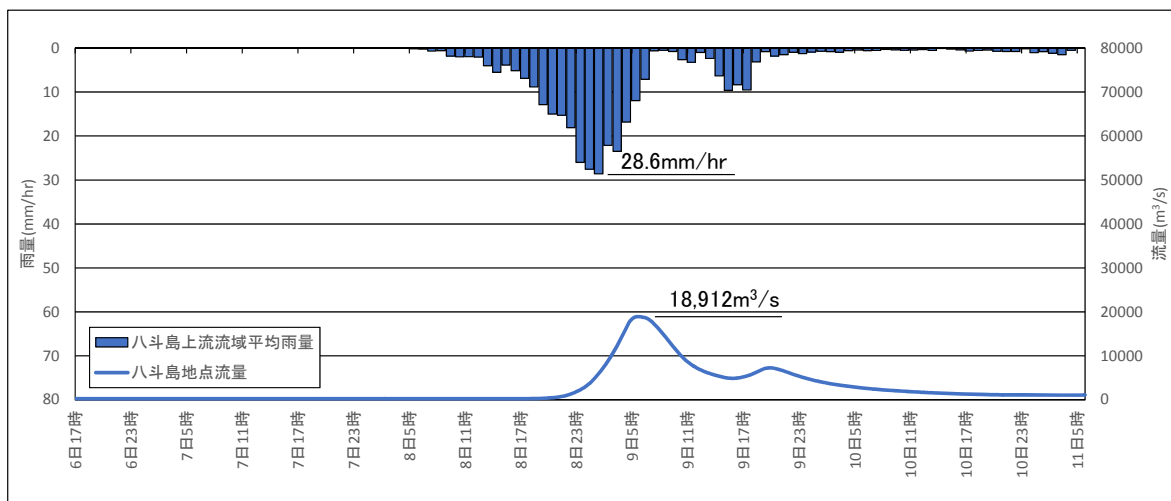
対象豪雨	八斗島地点 ピーク流量 (m^3/s)
豪雨1:2001/09/10	19,398
豪雨2:2002/07/11	23,233
豪雨3:2004/10/09	18,912
豪雨4:2004/10/21	23,458
豪雨5:2006/07/19	20,194
豪雨6:2007/09/07	25,462



(a) 豪雨 1

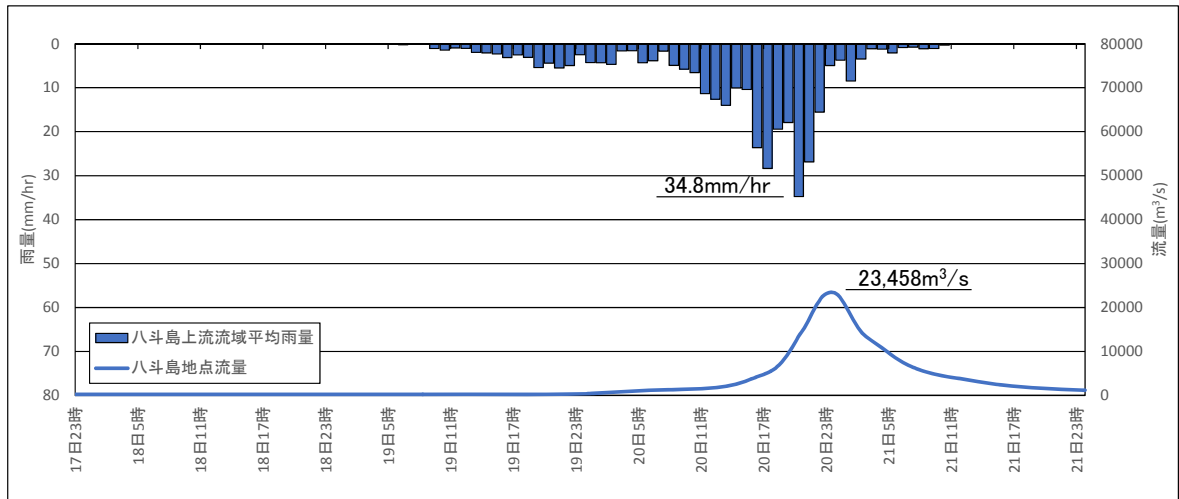


(b) 豪雨 2

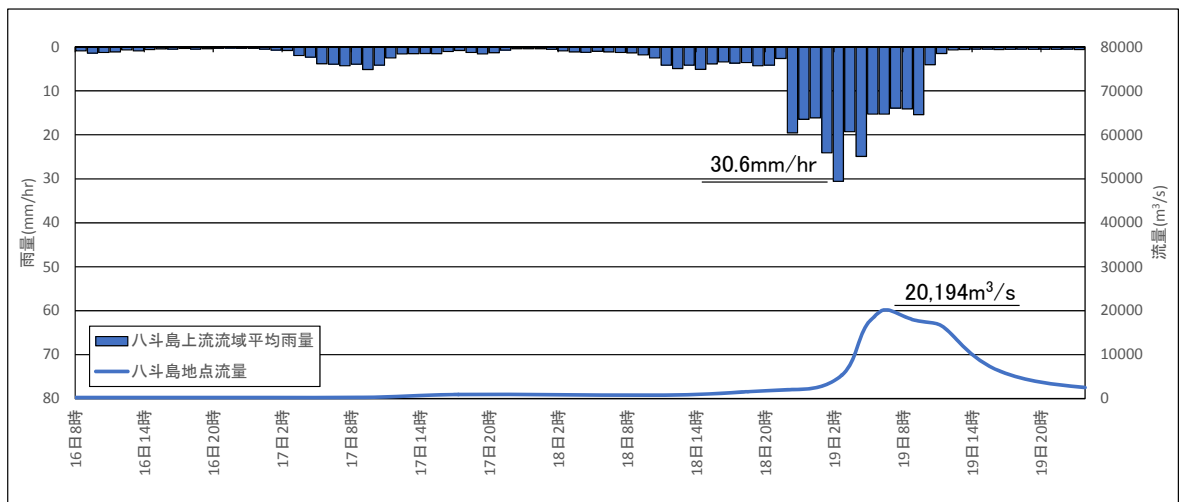


(c) 豪雨 3

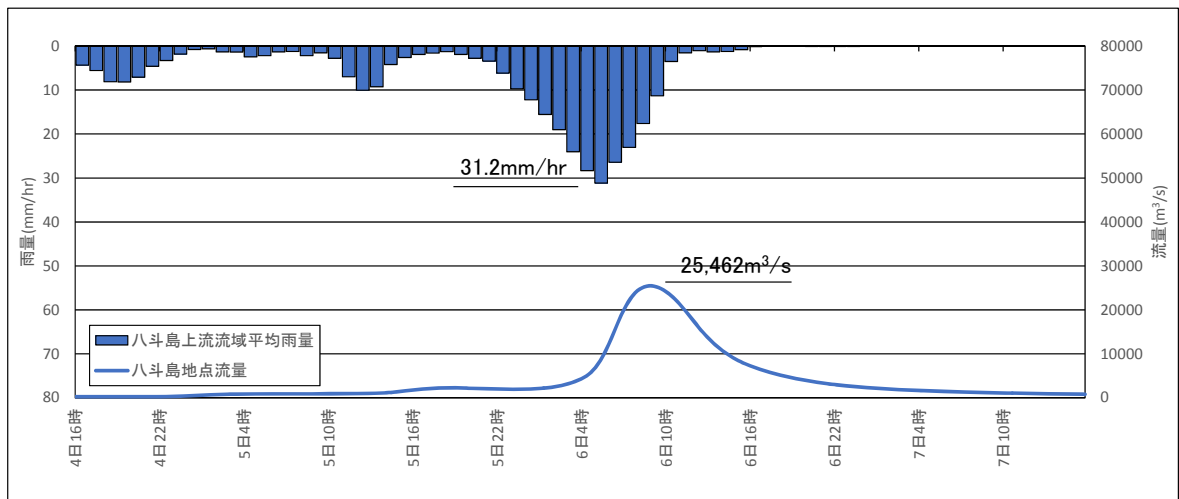
図 6.3(1) 流出計算結果(現況) 豪雨 1, 豪雨 2, 豪雨 3



(d) 豪雨 4



(e) 豪雨 5



(f) 豪雨 6

図 6.3(2) 流出計算結果(現況) 豪雨 4, 豪雨 5, 豪雨 6

6.3.2 時空間分布の違いが流量に与える影響

第5章において降雨継続時間毎、および地域毎の PMP とその時空間分布の設定を行った。ここでは以下の理由から、時空間分布の違いが流量に与える影響を説明する。

(1) 現行河川計画における降雨波形作成との違いを明らかにするため

これまで、直轄河川における計画降雨の作成は、降雨継続時間(利根川においては 72 時間)において実績雨量を計画降雨量に一律に引き伸ばしを行い計画降雨波形とする場合が多い。これに対して、本手法では PMP とその時空間分布の設定方法が流量規模として比較することにより PMF に与える影響を明らかにする。

(2) PMF に影響を与える時空間分布を明らかにするため

前項の現況における PMF は地域分布を考慮しない八斗島流域平均雨量に対して降雨継続時間毎に引き伸ばしを行った降雨波形を用いた場合となった。このような違いは地域毎の PMP と引き伸ばし前の雨量との関係などにより異なると考えられ、時空間分布の違いによる影響を検討し PMF を設定する必要がある。

このような目的を踏まえ、以下の 4 ケースについて流出計算を実施し時空間分布の違いが流量に与える影響を考察した。

ケース 1：八斗島流域 72 時間雨量 PMP である 341mm に対して一律引き伸ばしを行う

ケース 2：八斗島流域において、実績雨量を 12 時間 PMP, 24 時間 PMP および 72 時間雨量 PMP 対して引き伸ばしを行う。

ケース 3：台風性豪雨である豪雨 1, および豪雨 6 について相対湿度 100%の WRF 計算結果に対して 12 時間 PMP, 24 時間 PMP および 72 時間雨量 PMP 対して引き伸ばしを行う。

ケース 4：烏・神流川, 吾妻川, および奥利根流域毎に降雨継続時間毎の引き伸ばしを行う。

その結果、表 6.3 に示すように豪雨 1 および豪雨 6 に関してはケース 3 が、その他の豪雨 2～5 に関してはケース 2 が最大となる結果となった。また、これらの各豪雨の最大値と流域一律での引き伸ばしを行ったケース 1 との差分は約 $7,000\text{m}^3/\text{s}$ であることが分かる。これらの流量の違いを 6 豪雨の中で最大となった豪雨 6 について流量ハイドログラフの違いを図 6.4 に示す。さらに、ケース 4 が烏・神流川流域、吾妻川流域、および奥利根流域において地域毎の PMP を用いた降雨波形を設定したケースであり、ケース 3 に対して約 $5,000\text{m}^3/\text{s}$ 小さくなっている。この理由は以下のとおりである。ケース 4 の降雨波形は図 5.42 に示す烏・神流川流域、および図 5.44 における奥利根流域における降雨波形に示すように 12 時間雨量が相対湿度 100%雨量に対して引縮めとなっているため、八斗島流域平均雨量が地域分布を考慮しないケース 3 に対して小さくなっているためである。したがって、降雨継続時間毎と流域毎の PMP から考えられる時空間分布を複数設定した流出計算結果から PMF の検討を行う必要があることがわかる。

表 6.3 対象豪雨の降雨分布の違いによる八斗島地点ピーク流量

対象豪雨	八斗島地点ピーク流量 (m^3/s)			
	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
豪雨1:2001/09/10	8,527	13,468	19,398	17,172
豪雨2:2002/07/11	18,861	23,233	—	18,073
豪雨3:2004/10/09	15,771	18,912	—	15,530
豪雨4:2004/10/21	23,425	23,458	—	22,904
豪雨5:2006/07/19	11,476	20,194	—	18,632
豪雨6:2007/09/07	12,661	20,560	25,462	22,875

: 各豪雨で流量最大となる時空間分布ケース

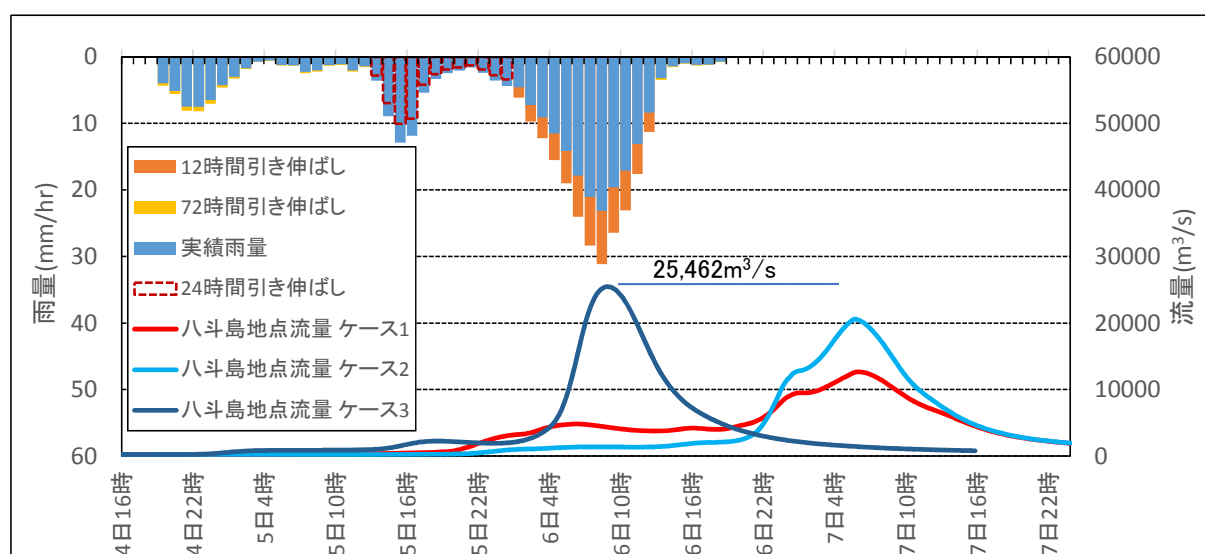


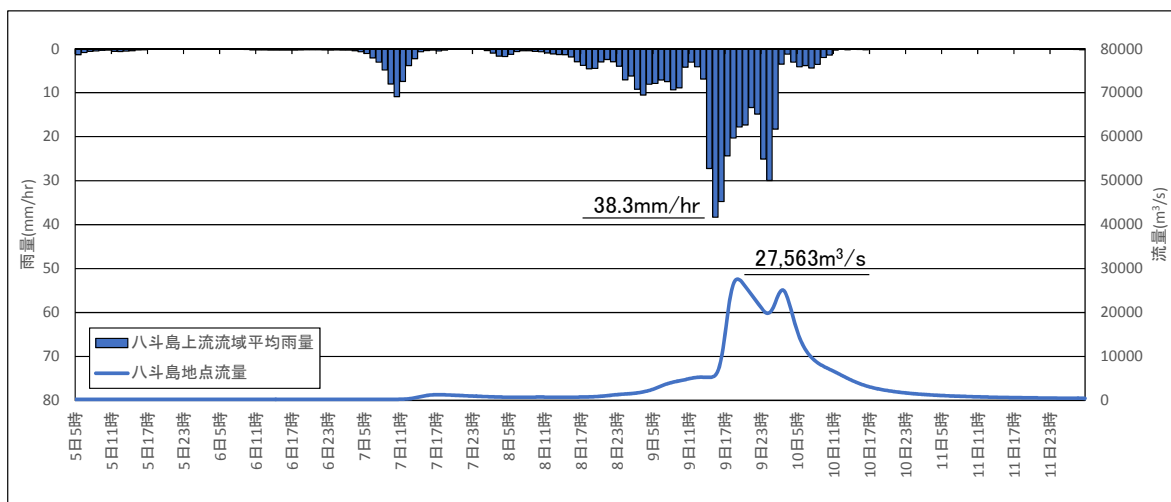
図 6.4 PMF の時間分布による違い(豪雨 6)

6.3.3 気候変動を考慮した PMF

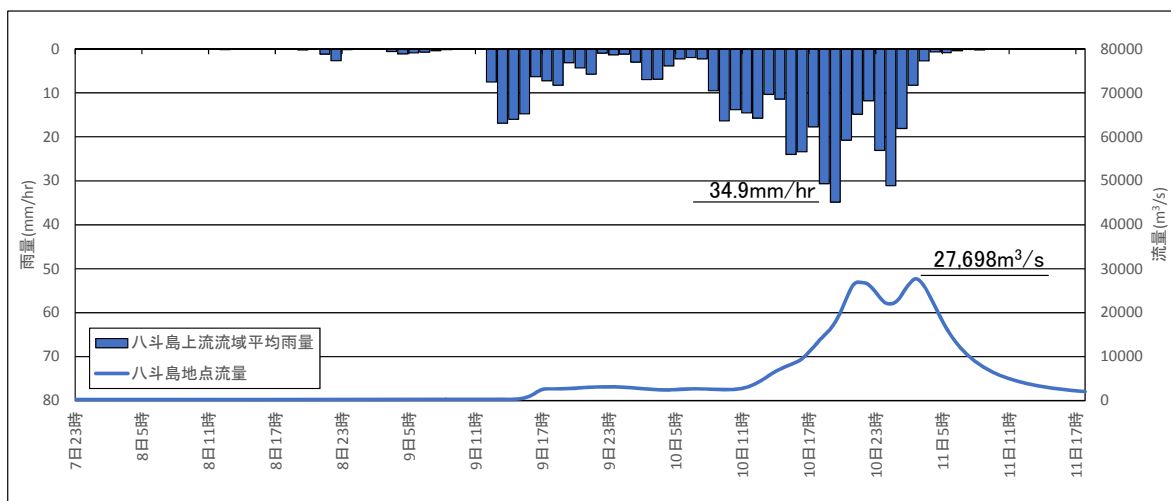
第5章において算定した降雨継続時間毎の PMP を用いて検討対象6 豪雨の流出計算結果を表 6.4 に、流量ハイドログラフを図 6.5 (1)～(2)に示す。6 豪雨中 6 豪雨全てが利根川河川整備基本方針における基本高水のピーク流量 $22,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流量となっており、その中で豪雨6が $35,733\text{m}^3/\text{s}$ と最大となっている。気候変動を考慮したケースは、図 5.42～図 5.44 に示すように PMP が相対湿度 100%に対する雨量に対して大きくなっているため、現況とは異なり地域分布を考慮したケースが最大流量となっている。

表 6.4 気候変動の影響を考慮した八斗島地点ピーク流量

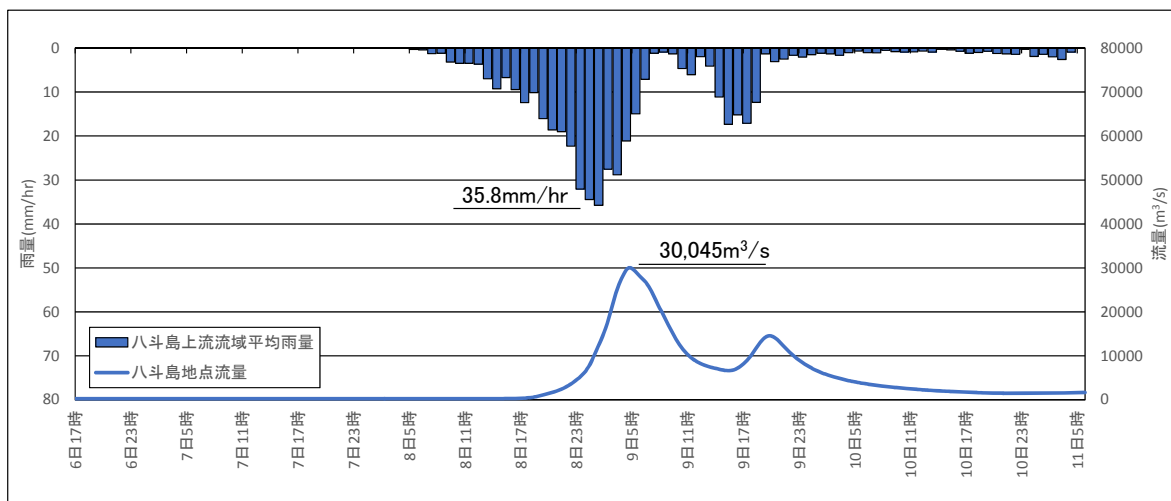
対象豪雨	八斗島地点 ピーク流量 (m^3/s)
豪雨1:2001/09/10	27,563
豪雨2:2002/07/11	27,698
豪雨3:2004/10/09	30,045
豪雨4:2004/10/21	34,945
豪雨5:2006/07/19	30,023
豪雨6:2007/09/07	35,733



(a) 豪雨 1

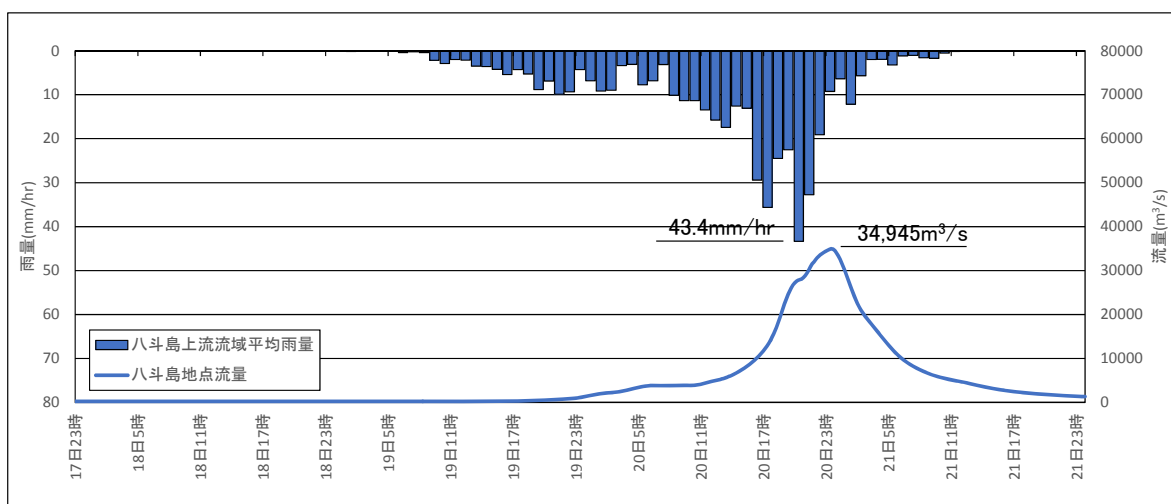


(b) 豪雨 2

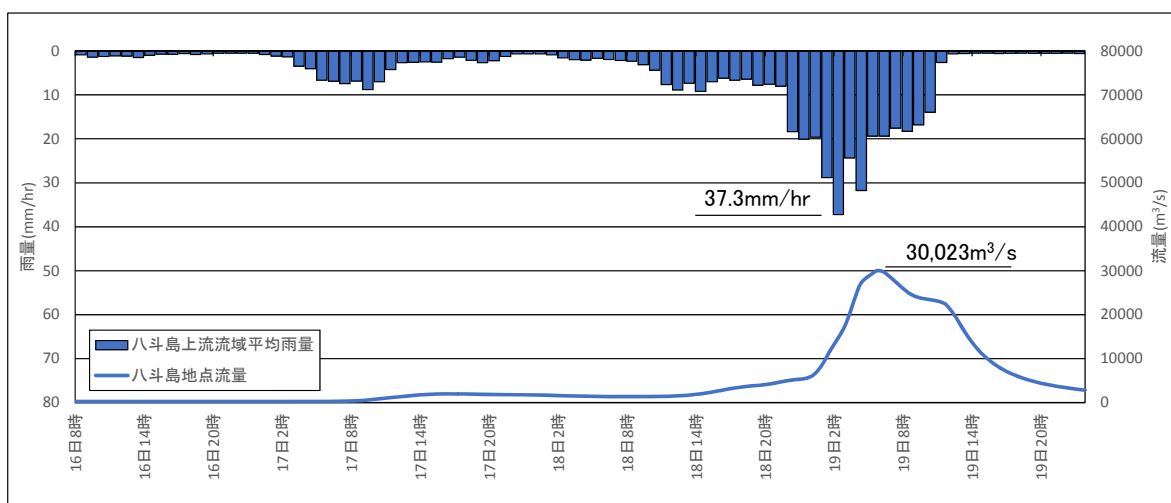


(c) 豪雨 3

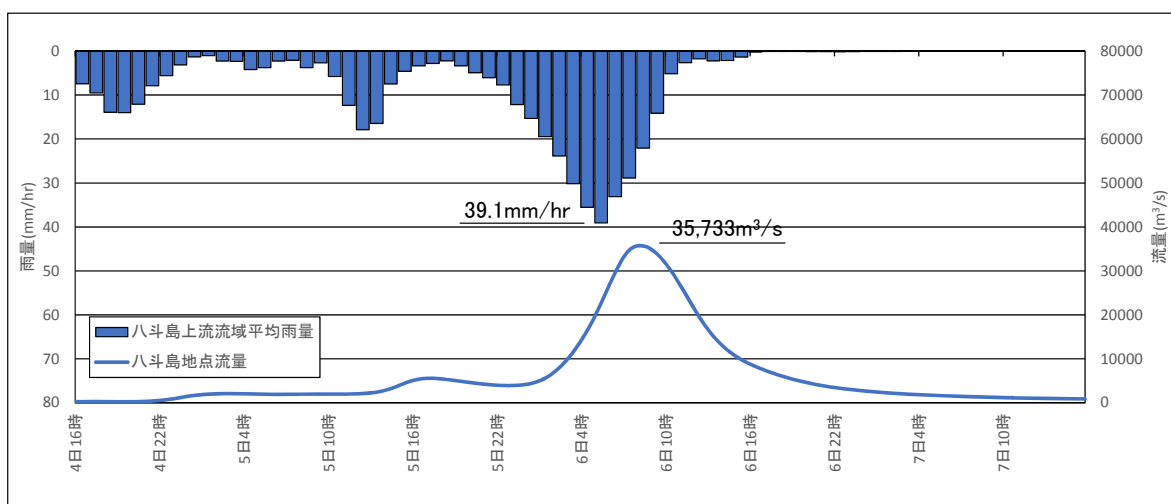
図 6.5(1) 流出計算結果(気候変動考慮) 豪雨 1, 豪雨 2, 豪雨 3



(d) 豪雨 4



(e) 豪雨 5



(f) 豪雨 6

図 6.5(2) 流出計算結果(気候変動考慮) 豪雨 4, 豪雨 5, 豪雨 6

6.4 結語

第6章においては、可能最大降雨量とその時空間分布を踏まえた流出計算を現況条件、気候変動を考慮した条件について行った。第6章において得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) PMP とその時空間分布に対して PMF を算定する手法を示した。現況条件では、検討対象 6 豪雨中 3 豪雨が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 $22,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流量となる。これらのうち、最大値は豪雨 6 の約 $26,000\text{m}^3/\text{s}$ となる。
- (2) 降雨継続時間毎と流域毎の PMP から考えられる時空間分布を複数設定した流出計算結果から PMF の検討を行う手法を示した。今回検討対象とした 6 豪雨では、72 時間雨量が同じでも、継続時間毎の最大化、時間分布の変化は $5,000\text{m}^3/\text{s} \sim 7,000\text{m}^3/\text{s}$ 程度のピーク流量の変化を与えることがわかった。このような時空間分布の変化を踏まえて PMF の設定を行う必要がある。
- (3) 気候変動を考慮した PMP を用いると検討対象 6 豪雨すべてが $22,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上となり最大値は約 $36,000\text{m}^3/\text{s}$ と現況における PMF より $10,000\text{m}^3/\text{s}$ 程度大きくなる。

第 6 章の参考文献

- 1) 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.

第7章 結論

7.1 結論

本論文では、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)の推定を目指した研究を行った。特に本研究では、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 の推定手法に関する研究を行った。

第1章では、研究の背景を整理した上で、え日本の河川流域に適用するための従来の研究の課題を明らかにすると共に、本研究の目的、および構成を述べた。第2章では、検討を行う対象流域の概要と対象降雨の特性について述べた。第3章では、気象条件の変化と降雨量の関係を把握に用いる気象モデル WRF の検討対象豪雨に対する再現性を検討した。第4章では WRF を用いて気象条件の変化と降雨の時空間分布の関係を把握した。以上の関係を用いて、第5章では可能最大降水量(PMP)とその時空間分布の推定手法を示し、第6章において河川計画の直接の外力である可能最大洪水(PMF)を推定する手法を提案した。

以下に、本研究において得られた結論を各章毎に述べる。

第2章「対象流域と対象豪雨」では、検討対象流域として日本最大の流域面積を有する利根川流域を対象とし、八斗島基準地点における既往最大3日雨量、基本高水のピーク流量などPMP、およびPMF推定の指標となる諸元を把握した。対象豪雨としては近年の豪雨から八斗島上流域平均72時間雨量が概ね100mm以上である6豪雨を対象とすることを述べ、降雨成因、降雨の時空間分布を把握することにより、PMP推定の基礎資料とした。

第3章「実績豪雨の再現性」では、気象モデルWRFの最適な物理パラメタリゼーションを設定し再現計算を行った。その結果、八斗島上流平均72時間雨量に対する再現性は68%から168%の間にあった。また、最大1時間流域平均雨量に関しては70%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っている。以上の結果から、解析雨量と再現計算結果の時間分布、平面分布は概ね一致しており豪雨に対して再現性を確保したWRFモデルの構築を行った。

第4章「気象条件の変化が豪雨の時空間分布に与える影響」では、流域規模での降雨量は従来のWMOの手法において指標としている可降水量よりも水蒸気フラックスの相関が高いことを示した。さらに、相対湿度を变化が降雨に時空間分布に与える影響を降雨成因毎に検討し、台風性豪雨では、水蒸気フラックスの増加は総雨量の変化だけでなく、降雨ピークの発生時刻を早くとともに、一連降雨の前半に新たな降雨ピークを発生させるなど時間分布にも影響を与えることを明らかにした。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、河川計画上は重要な影響である。次に、水蒸気フラックスと降雨量の関係把握から八斗島流域平

均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明らかにした。また、小流域である烏・神流川流域、吾妻川流域、および奥利根流域においても水蒸気フラックスと雨量の相関は高く、水蒸気フラックスは降雨継続時間毎、および地域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。

第5章「可能最大降水量(PMP)と時空間分布の推定」では、降雨量と相関の高い気圧面の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から過去最大水蒸気フラックスを算定した。過去最大水蒸気フラックスから推定される八斗島流域平均最大雨量は72時間雨量について341mmとなり、カスリン台風時の雨量を越える規模となった。また、12時間雨量、および24時間雨量については、それぞれ225mm, 273mmとなっており相対湿度を変化させた気象モデルWRF計算結果の最大降雨量程度となっている。また、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分かった。降雨の時空間分布の設定に関しては、降雨量と最も相関の高い水蒸気フラックスの気圧面と継続時間に対して降雨継続時間毎の雨量に不整合が生じないように、PMPとその時空間分布を設定する手法を提案した。12, 24, 72時間PMP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おり実績最大雨量と同様な傾向を示している。一方、実績降雨に対する増加率は吾妻川流域および奥利根川流域が烏・神流川流域に対して大きくなる結果となった。

次に、気候変動を考慮したPMPの推定として気候変動予測値を用いた検討を行った気候変動予測値は2014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RCP8.5シナリオの出力値から最大水蒸気フラックスを算定した。RCP8.5において出力されている積雲対流スキーム3ケース、海面水温3ケースの違いによる9ケースの将来ケースから最大水蒸気フラックスの算定を行った。その結果、水蒸気フラックスは、Kain-Fritschスキーム(KF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)において最大となり、八斗島上流域平均12, 24, および72時間雨量はそれぞれ274mm, 366mm, および496mmとなった。

第6章「可能最大洪水(PMF)の推定」では、利根川水系河川整備基本方針において流量算定に用いられている貯留関数法による流出計算モデルを用いて、PMPおよびその時空間分布を与えた流出計算結果から、河川計画における直接の外力である可能最大洪水(PMF)を評価する手法を明らかにした。現況条件では、八斗島地点におけるPMFは約26,000m³/sとなり、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以上の流量とった。次に、気候変動を考慮したPMFは約36,000m³/sと現況の可能最大洪水より約10,000m³/s程度大きくなった。さらに、降雨継続時間毎と流域毎のPMPから考えられる時空間分布を複数設定した流出計算結果からPMFの設定を行う重要性を示した。

7.2 今後の課題

PMPの精度を向上と、河川計画における手法の適用性を高めるための今後の課題を以下に示す。

(1) 降雨と指標の関係式の精度向上

本研究における PMP の推定は、近年の 6 豪雨を対象として気象モデルを用い、水蒸気フラックスと降雨量の関係式を作成し最大水蒸気フラックスを与えることにより行った。しかしながら、解析対象とした豪雨の実績値がデータの所在状況から選定しているため、降雨規模がさらに大きくなる範囲の指標と降雨の関係を把握する必要がある。本研究において推定した現況 PMP は過去最大値からの推定値が概ね WRF 計算結果の最大値程度となっていたが、気候変動を考慮した最大水蒸気フラックスは WRF 計算結果の外挿範囲に位置している。このため、出力値の降雨規模ができるだけ大きい JRA-55 再解析データ、および気候変動予測値を対象とした気象モデルの作成を行い、指標と降雨の関係式の改良を行うことにより PMP 推定精度の向上を図る必要がある。

(2) 台風経路の変化を考慮した PMP の検討

本研究では、実際に発生した台風経路における気象条件を変化させた降雨の最大化の検討を行った。台風経路に関しては、実績データに関しても気候変動予測データの出力に関しても限られた期間の出力によるものであり、対象流域においてもっとも危険な経路となっていない可能性がある。したがって、台風経路を変化させ流域で最大クラスの降雨量となる経路を設定し、その経路において気象モデルを用いて相対湿度を変化させ水蒸気フラックスと降雨量の関係式を作成することにより、PMP 推定精度の向上を図る必要がある。

(3) 気象条件、地形条件などの異なる流域での適用性の検討

本研究では利根川流域を対象として検討を行い一定の成果が得られたが、今後、日本全国の河川流域への適用を考えると、条件の異なる流域において検討を行い、広く適用できる手法とする必要がある。流域の位置、地形特性、主要な降雨成因等が異なる流域を対象として、PMP および PMF の推定について検討を行うことにより、条件の違いによる推定精度の体系的な評価を行い、全国の河川流域においても適用性の高い手法を検討する必要がある。

近年の甚大な洪水被害の発生や今後の気候変動の影響や踏まえ「想定最大外力」を設定して被害軽減対策の検討を行う重要性が高くなっている。想定最大外力の 1 つの指標として可能最大降水量(PMP)の推定は日本の河川流域は複雑な地形条件等の「個性」に応じた適切な評価を行うことが必要である。このような観点から、降雨量を変化と相関の高い指標を選定すること、および降雨量と指標の物理的な関係を外力の大きな条件で把握することが必要であった。これらの課題に対して、主要豪雨時の降雨継続時間内雨量と相関の高い指標として水蒸気フラックスが適切であることを示した。さらに、降雨量と水蒸気フラックスの相関に関し

ては気象モデル WRF を用いて関係式の把握を行った。次に、可能最大降水量(PMP)の推定には各流域が過去に蒙った事象、および将来発生が予測される長期データを踏まえて行うことが必要であると考え、過去のデータに関しては過去に 100 年間以上遡った長期データを用いて設定した。将来の予測値に関しては 21 世紀末においてもっとも影響が大きいとされている排出シナリオを用いて推定を行った。さらにこれらの方法により推定した PMP を用いて河川計画における直接の外力である流量として可能最大洪水(PMF)の推定を行った。

以上の成果により、日本の河川流域の特徴に応じた「想定最大外力」の設定を行うことができ超過洪水対策、気候変動適応策に寄与することができたと考えている。

今後、上記の課題を踏まえた推定精度向上を行うことにより、本研究において得られた成果が日本の河川計画、超過洪水対策、および、気候変動に対する適応策検討に取り入れられ、甚大な被害の軽減に役立つことを祈念します。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、鳥取大学大学院工学研究科准教授 矢島啓先生には、いつも研究内容や方針について大局的な視点から助言とご指摘をいただきました。また、技術的面に限らず、研究に対する取り組み方などあらゆる面からご指導を賜りました。心より御礼申し上げます。

鳥取大学大学院工学研究科教授 檜谷治先生、鳥取大学大学副学長・教授 松見吉晴先生には、研究の過程で発表を聞いていただいた際や、論文審査を通じて有益なご助言とご指導を賜りました。ここに御礼申し上げます。

京都大学防災研究所 副所長・教授 中北英一先生には、研究の方向性や手法、結果の評価などについて有益なご助言とご指導を賜りました。心より御礼申し上げます。

宇都宮大学名誉教授 須賀堯三先生には、研究に対する取り組み姿勢、河川技術者としての研究成果の活用について豊かな知識を踏まえた多くの助言をいただきました。厚く御礼申し上げます。

本研究は一般財団法人国土技術研究センターの研究助成を受けて実施いたしました。ここに御礼申し上げます。また、一般財団法人国土技術研究センター 湧川勝巳情報・企画部部長をはじめ河川政策グループの皆様には国土技術研究センターでの勉強会での発表の機会を与えてくださり、河川計画への適用にあたって貴重なアドバイスをいただきました。心より御礼申し上げます。

本研究における活用した気候変動モデルのデータセットは、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)の枠組みの下で収集・提供いただきました。データ取得にあたっては、東京大学 DIAS 事務局 玉川勝徳様には効率的なデータ取得が可能となるようご尽力いただきました。ここに御礼申し上げます。

当時前橋地方気象台防災業務課 小野沢和博調査官(現東京管区気象台総務部業務課)には前橋地上観測所の過去の気象データの取得とデータの取り扱いについて貴重なアドバイスをいただきました。厚く御礼申し上げます。

本研究のデータ分析、気象モデルを用いた計算作業を進めるにあたっては、当時鳥取大学修士課程 細川達也氏(現中央コンサルタンツ株式会社)、株式会社インテリジェントデザイン 國井浩氏に多大なご協力をいただきました。厚く御礼申し上げます。また、膨大な気候予測モデルの取得と効率的な活用についてはパシフィックコンサルタンツ株式会社国土保全事業本部 浜口憲一郎部長、株式会社インテリジェントデザイン 小泉剛氏にご協力いただきました。心より感謝致します。

パシフィックコンサルタンツ株式会社の当時河川部長藤堂正樹氏(現国際事業本部 国際営業部長)には社会人課程として鳥取大学に入学するにあたり貴重なアドバイスご支援を頂きました。心より御礼申し上げます。また、高松宏行河川部長をはじめとする社内の河川・防災系の皆様には、私が大学で学ぶにあたり、ご支援いただきました。心から感謝いたします。