

高知工科大学大学院 修士課程

工学研究科 修士論文

物部川の時空間降雨分布の特性分析による想定  
最大外力導出に関する研究

Estimation Methodology for Probable Maximum Rainfall  
Pattern at River Basin  
～Case Study of Monobe River～

基盤工学専攻  
社会システム工学コース

指導教員 那須清吾  
副指導教員 高木方隆  
副審査員 中根英昭

岡田諒

2019年1月



## 要旨

西日本を中心に広範囲で記録的な大雨となった平成30年7月豪雨をはじめ、時間雨量50mmを上回る豪雨が、近年増加傾向にある。以前より明らかに雨の降り方が過激化していることから、国土交通省は平成27年1月20日「新たなステージに対応した防災・減災のあり方」を公表した。ここでは、従来の河川防災の基本であった、インフラで洪水の制御を行うだけでなく、最大クラスの大雨に対して、個人、企業、地方公共団体、国等が連携して対策を行うことが必要であることを示している。

本論文では、防災の基礎情報となる最大クラスの大雨(想定最大外力)の合理的な導出方法を明らかにすることを目的としている。高知県東部に位置する一級河川である物部川を対象とした。想定最大降雨の導出を行うためには、効率的に洪水が発生する空間的・時間的降雨分布を明らかにすることが必要である。過去の洪水時の流域内雨量観測所のデータと観測流量の関係を分析し、効率的な洪水が発生する降雨分布が3パターン存在することが分かった。また、流出解析を行うために、ディープラーニングを用いて水文モデルを構築した。モデルの学習時に使用するデータの期間の選定や、雨量データの時系列の設定、時系列の分解能の設定など、適切なパラメータを設定することにより、過去の洪水を忠実に再現することができる水文モデルを構築することができた。

想定最大規模降雨の降雨量は降雨継続時間から算出されており、物部川の降雨継続時間は12時間である。想定最大外力を求めるために効率的な洪水が発生する降雨分布を複数の手法を用いての引き伸ばしによる降雨波形の作成や、想定最大規模降雨の降雨量から求められる人工降雨波形を作成し、流出解析を行った。複数の降雨分布で解析を行った結果、想定最大外力を求めるためには12時間よりも長い期間の降雨分布を検討する必要があることが分かった。

## **abstract**

In recent years, heavy rainfall such as hourly rainfall exceeding 50 mm has been increasing. In addition to flood control in infrastructure, public organizations have shown that it is important for citizens and public organizations to work together.

The purpose of this study is an estimation of methodology for the probable maximum probable maximum rainfall pattern. The case of the Monobe River located in the eastern part of Kochi Prefecture. In order to estimate the methodology, it was necessary to analyze the rainfall (spatial rainfall distribution and temporal rainfall distribution) causing the flood. The analysis of rainfall and discharge observed in the past showed that there are 3 patterns as the main rainfall causing the flood.

A hydrological model was constructed using deep learning. Runoff analysis was performed using this model. By setting the amount and resolution of the optimal rainfall data, a highly accurate model was created.

Some rainfalls were amplified in multiple ways to determine the probable maximum rainfall pattern. It showed a result which is necessary to consider the distribution of rainfall for a period longer than 12 hours in order to know the probable maximum rainfall pattern .

# 目次

要旨	i
abstract	ii
<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 背景	1
1.2 リサーチクエスチョン	2
1.3 研究目的	2
1.4 研究方法	2
1.4.1 物部川の危険な洪水が起きる空間的・時間的降雨分布の分析	2
1.4.2 ディープラーニングによる水文モデルの構築	2
1.4.3 想定最大外力の検討	3
<b>第2章 対象河川の概要</b>	<b>5</b>
2.1 物部川の概要	5
2.2 物部川における過去の被害	6
<b>第3章 洪水が発生させる空間的・時間的降雨分布の分析</b>	<b>9</b>
3.1 分析方法	9
3.2 12時間降雨量とピーク流量の関係に基づく危険な降雨分布の選定	9
3.3 洪水を引き起こした降雨分布の特徴の整理	10
3.3.1 (a)2010年5月24日	10
3.3.2 (b)2010年6月26日	12
3.3.3 (c)2011年9月21日	13
3.3.4 (d)2012年7月12日	14
3.3.5 (e)2014年8月10日	15
3.3.6 (f)2015年7月17日	16
3.4 危険な降雨パターンの分類	17
3.5 まとめ	18
<b>第4章 ディープラーニングによる水位モデルの構築</b>	<b>21</b>
4.1 ディープラーニングとは	21
4.2 ディープラーニングによるモデルの構造	21
4.3 学習に使用するデータの特徴	22

4.4	モデル構築に使用可能なデータ . . . . .	23
<b>第5章</b>	<b>最適なモデル構築に向けて学習に必要な雨量データの設定</b>	<b>25</b>
5.1	モデルの構築の課題 . . . . .	25
5.2	学習に用いる雨量データ量の検討 . . . . .	26
5.3	学習に用いる雨量データの分解能の検討 . . . . .	28
5.4	まとめ . . . . .	36
<b>第6章</b>	<b>想定最大外力(降雨)の導出方法の検討</b>	<b>37</b>
6.1	国土交通省が提示している想定最大外力の考え方 . . . . .	37
6.2	降雨波形の引き伸ばしの検討と引き伸ばしを考慮した降雨波形の作成	37
6.3	想定最大規模降雨の降雨量に基づく人工降雨波形の作成 . . . . .	38
6.4	引き伸ばし後の降雨波形と人工降雨波形の特徴の比較 . . . . .	39
6.5	まとめ . . . . .	40
<b>第7章</b>	<b>水文モデルへの想定最大外力の適応結果と考察</b>	<b>41</b>
7.1	水文モデルへの想定最大外力の適応結果 . . . . .	41
7.2	考察 . . . . .	44
<b>第8章</b>	<b>結論</b>	<b>45</b>
	<b>謝辞</b>	<b>47</b>

# 目次

1.1	1時間降水量 50mm 以上の年間発生回数	1
2.1	物部川流域	5
3.1	洪水時における流域平均 12 時間雨量と杉田ダムのピーク流量	10
3.2	2010 年 5 月 23 日から 25 日における各雨量観測所の降雨波形	11
3.3	5 月 24 日の天気図	11
3.4	2010 年 6 月 25 日から 27 日における各雨量観測所の降雨波形	12
3.5	6 月 26 日の天気図	12
3.6	2011 年 9 月 20 日から 22 日における各雨量観測所の降雨波形	13
3.7	9 月 21 日の台風の経路と天気図	14
3.8	2012 年 7 月 11 日から 13 日における各雨量観測所の降雨波形	15
3.9	7 月 12 日の天気図	15
3.10	2014 年 8 月 9 日から 11 日における各雨量観測所の降雨波形	16
3.11	8 月 10 日の台風の経路と天気図	16
3.12	7 月 16 日から 18 日における各雨量観測所の降雨波形	17
3.13	2015 年 7 月 17 日の台風の経路と天気図	17
3.14	危険な降雨分布の分類	18
4.1	ニューラルネットワークの構造	22
4.2	雨量観測所と水位観測所の位置	23
4.3	雨量観測所と水位観測所の位置	24
5.1	データセットの作成例	25
5.2	短期雨量時系列における実測値と推定値の推定結果	26
5.3	短期雨量時系列における実測値と推定値の散布	27
5.4	長期雨量時系列における実測値と推定値の推定結果	27
5.5	長期雨量時系列における実測値と推定値の散布	28
5.6	1 時間時系列の長さや平均雨量の間隔のパラメータ	29
5.7	1 時間時系列 96 時間の推定結果	29
5.8	1 時間時系列 288 時間の推定結果	30
5.9	平均雨量の間隔 30 日の推定結果	31
5.10	平均雨量の間隔 20 日の推定結果	31

5.11	仮想的な降雨波形 . . . . .	32
5.12	平均化した降雨波形 . . . . .	33
5.13	複数の水位モデルの RMSE 値 . . . . .	34
5.14	平均雨量の間隔 6 時間 . . . . .	35
5.15	平均雨量の間隔 480 時間 . . . . .	35
5.16	平均雨量の間隔 6 時間 . . . . .	36
6.1	前方・中央・後方集中型の降雨波形 . . . . .	39
7.1	各シナリオ結果による推定結果 . . . . .	41
7.2	2010 年 5 月の洪水の推定水位 (シナリオ (ii) による引き延ばし) . . . . .	42
7.3	2010 年 6 月の洪水の推定水位 (シナリオ (ii) による引き延ばし) . . . . .	42
7.4	2011 年 9 月の洪水の推定水位 (シナリオ (ii) による引き延ばし) . . . . .	43
7.5	2012 年 7 月の洪水の推定水位 (シナリオ (ii) による引き延ばし) . . . . .	43
7.6	2014 年 8 月の洪水の推定水位 (シナリオ (ii) による引き延ばし) . . . . .	44



# 第1章 序論

## 1.1 背景

近年、大雨や短時間強雨の発生頻度が増加し、大雨による降水量が増大するなどの極端な雨の降り方が現実的に起きており、計画規模を上回る洪水により大規模な氾濫が発生している。[1] 例えば平成 24 年には大阪府寝屋川市等において時間雨量 100mm を大幅に超える短時間強雨により大規模な内水氾濫が発生している。[2] また、今後地球温暖化に伴う気候変動により、大雨による降水量が増加することや、短時間強雨の発生頻度が増加することなどが予測されており、水害の激甚化が想定される。図 1.1[1]

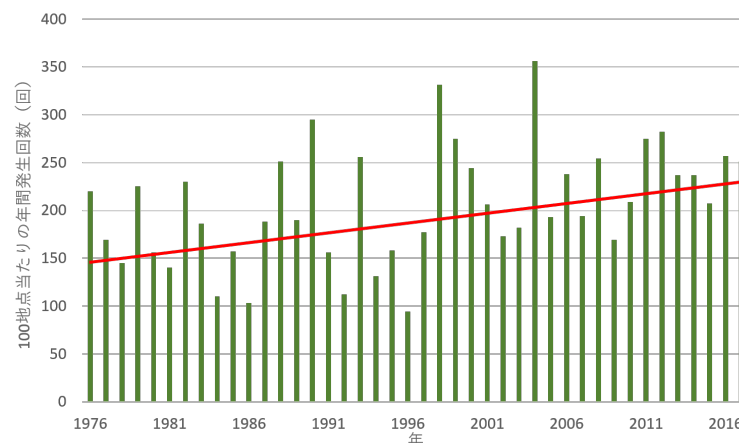


図 1.1: 1 時間降水量 50mm 以上の年間発生回数

これを踏まえて国土交通省では、平成 27 年 1 月に水害・土砂災害等に関連する今後の防災・減災対策の検討の方向性として、「新たなステージに対応した防災・減災のあり方」[3] をとりまとめた。津波・地震対策と同様に、洪水等においても最悪の事態を想定し、最大クラスの洪水等に対して「少なくとも命を守り、社会経済に壊滅的な被害が発生しない」ことを目標とし、ソフト対策に重点を置き、危機感を共有して社会全体で対応することとしている。最大クラスの洪水(以下、想定最大降雨)とは何かを、想定しておくことが必要不可欠であり、想定最大外力の合理的な導出方法が必要だと考えた。

## 1.2 リサーチクエスチョン

国土交通省が公表している「想定最大外力の設定の手法」[4]では、降雨面積と降雨時間から想定最大規模降雨の降雨量が与えられる。河川整備基本方針を策定したときに採用した過去の洪水の降雨波形や近年の複数の洪水の降雨波形を想定最大規模降雨まで引き伸ばして最大の流量となるものを選択した。対象河川の流域面積、降雨継続時間から想定最大規模降雨の降雨量は決定できる。しかし、降雨波形については「想定最大外力の設定手法」では、基本高水を検討する際に用いた複数の降雨波形や最近の主要な洪水の降雨波形等を用いることとしており、大規模な洪水が発生するような、各河川の特性を考慮した時間的・空間的降雨分布(一定の降雨量に対して最大の洪水を発生させる降雨波形と分布)を十分に考慮していないのではないかという問題がある。よって本研究では効率的に洪水が発生する河川の特徴を含む降雨分布を明らかにし、合理的な想定最大外力の導出方法を明らかにすることとした。

## 1.3 研究目的

河川特性を考慮した想定最大外力の合理的な導出方法の構築を目指した。中規模程度の河川として高知県の東部に位置するの物部川を対象とし、物部川において効率的に洪水が起こる時間的・空間的降雨分布を求め、複数の引き伸ばし手法により物部川における想定最大外力を推定した。

## 1.4 研究方法

### 1.4.1 物部川の危険な洪水が起きる空間的・時間的降雨分布の分析

想定最大降雨を明らかにするために、物部川において効率的に洪水が発生する空間的・時間的降雨分布を明らかにすることが必要である。過去の洪水のピーク流量とその時の12時間雨量の関係より、12時間雨量に対し、ピーク流量が大きい洪水を効率的に洪水が起きるものとして、6個の洪水を選定した。

さらに選定した洪水の発生した要因の分析を行った。各雨量観測所の降雨波形、天気図、台風の経路を参考に物部川において効率的に洪水が発生する降雨分布を明らかにした。

### 1.4.2 ディープラーニングによる水文モデルの構築

ディープラーニングを用いて物部川の水文モデルの構築を行った。流域内の雨量観測所のデータを説明変数、物部川下流の深淵水位観測所のデータを被説明変

数としてモデルを作成した。過去の雨量と水位の膨大なデータを学習させることにより、その関係性を明らかにすることができる。学習データの設定条件を変化させ、高精度のモデルを構築した。

### 1.4.3 想定最大外力の検討

1.4.1において選定した危険な時空間的降雨分布を、複数の引き伸ばしシナリオで引き伸ばしを行い、流出解析を行った。引き伸ばしシナリオを(i)(iv)に示した。(i)として、流域全体から引き伸ばし倍率を決定し、各雨量観測所を一定の倍率で引き延ばす方法である。(ii)は(i)の降雨波形に対して想定最大規模降雨を超過した降雨をカットする方法である。(iii)は雨量観測所毎に、引き伸ばし倍率を決定し、引き延ばしを行う方法である。(iv)は(iii)の降雨波形に対して想定最大規模降雨を超過した降雨をカットする方法である。また、想定最大規模降雨から求められる人工降雨波形を作成し流出解析を行い、それぞれの結果の比較を行った。



## 第2章 対象河川の概要

### 2.1 物部川の概要

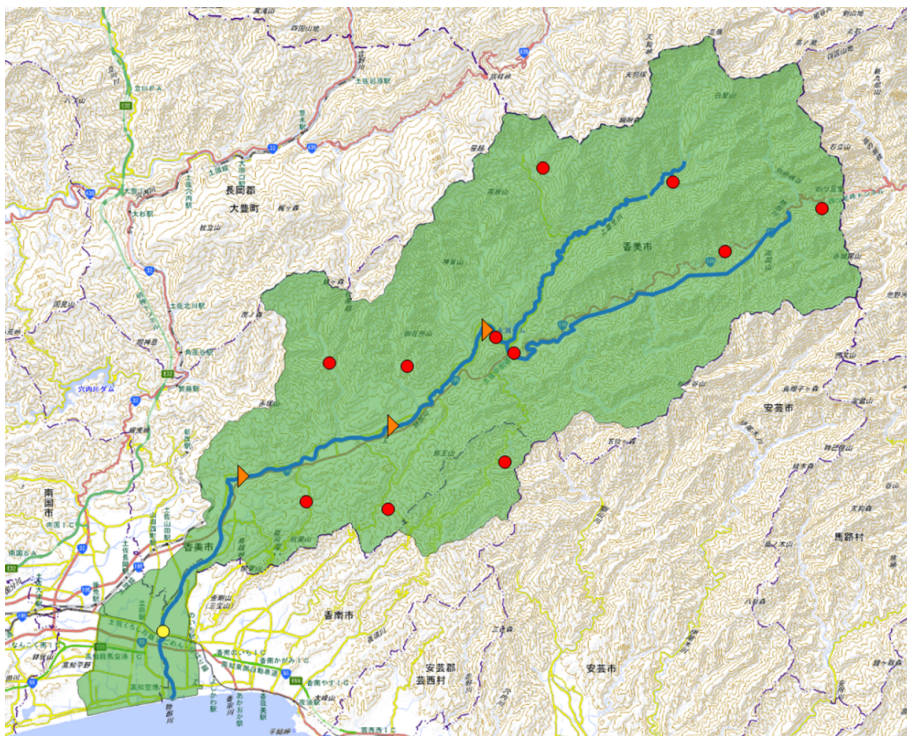


図 2.1: 物部川流域

流域は、高知県中部に位置し、南国市、香南市、香美市の3市からなり、幹川流路延長71km、流域面積508km<sup>2</sup>の一級河川である。河床勾配は、上流域は約1/40、中流域は約1/145、下流域は約1/280の急流河川である。気候は、太平洋岸式気候に属し、日本でも有数の高温多雨となっており、年平均降水量は約2,800mmに達している。[5]

## 2.2 物部川における過去の水害被害

物部川は過去に多くの水害被害をもたらした。下流域は扇状地形であるため、氾濫域は流域外にまで影響する可能性が高い。平成10年の‘98高知豪雨では支流の片地川の堤防が決壊し、死者が1名出る被害が記録されている。近年の水害について表2.1にまとめた。物部川は水害が多く治水対策を行う必要があることが分かる。

表 2.1: 物部川の過去の水害被害 [5]

年月日	種別	深 淵 流 量 ( $m^3/s$ )	被害
45.9.17	台風 16 号 (枕崎台風)	不明	物部川下の橋(現物部川大橋)が流出したという。・浸水家屋、被災農地：記録なし
54.9.14	台風 12 号	不明	工事中であった戸板島橋上流右岸堤防が一部決壊した。また、物部川下の橋が一部流出した。さらに、上流で切り出し中だった大量の流材を受けて山田堰が決壊流出した。 ・浸水家屋：168 戸 ・被災農地：158ha
61.9.16	台風 18 号	1500	流域の大部分が台風の眼域に入ったため雨量は少なく、増水による被害は比較的小さかった。 ・浸水家屋：270 戸 ・被災農地：364ha
63.8.10	台風 9 号	2500	流域内では死者 1 名を含む大きな被害が発生したが、物部川下流部でははん濫はなく、護岸等の被災も軽微であった。 ・浸水家屋：1,064 戸 ・被災農地：1,178ha
68.8.29	台風 10 号	3000	増水が短時間であったため、下流部では護岸等への被災はあったもののはん濫はせず、被害は小さかった。 ・浸水家屋：39 戸 ・被災農地：78ha

次ページに続く

前ページからの続き

年月日	種別	深 淵 流 量 ( $m^3/s$ )	被害
70.8.21	台風 10 号 (土佐湾台風)	4600	下流部では物部川橋の橋脚欠損、物部川下の橋の落橋等の大きな被害が発生した。また、流域内では宅地・農地への浸水被害が発生した。 ・全半壊家屋：2,185 戸 ・浸水家屋：2,936 戸 (流域関連自治体の合計被害)
71.8.30	台風 23 号	1800	流量規模は小さかったが、後川支川の新秋田川で内水被害が発生した。 ・浸水家屋：15 戸 ・被災農地：41ha
72.7.5	梅雨前線豪雨	4400	下流部のはん濫はなかったが、山田堰の決壊、香我美橋の橋脚流失、11 箇所もの護岸等が被災した。また、後川流域では内水による浸水被害が発生した。 ・浸水家屋：144 戸 ・被災農地：150ha
82.8.25-27	台風 13 号	2700	強雨期間が長かったことから、物部川下流部でも 6 箇所低水護岸等が被災した。
93.7.27-28	台風 5 号	不明	2 箇所低水護岸等が被災した。
98.9.25	秋雨前線豪雨 ('98 高知豪雨)	3700	隣接する二級河川国分川では未曾有の大災害となったが、物部川下流部では 2 箇所の低水護岸等の被災だけであった。しかし、支川片地川では堤防が決壊し、死者 1 名を含む被害が発生した。片地川の堤防が決壊、泥水が一部の民家に流れ込んだ。 ・全半壊家屋：53 戸 ・浸水家屋：2,743 戸 (流域関連自治体の合計被害)
04.8.30	台風 16 号	2900	高潮右岸箇所、立田箇所、深淵箇所、下の村箇所で低水護岸等が被災した。
04.10.20	台風 23 号	3000	深淵箇所で低水護岸等が被災した。

次ページに続く

前ページからの続き

年月日	種別	深 淵 流 量 ( $m^3/s$ )	被害
05.9.7	台風 14 号	2600	高潮左岸箇所、吉川下流箇所、吉川上流箇所、茨西（ばらにし）箇所、父養寺箇所で水制工等が被災した。

以上



## 第3章 洪水が発生させる空間的・時間的降雨分布の分析

### 3.1 分析方法

想定最大外力を検討する際、過去の主要な洪水のみをそのまま用いて検討するのではなく、効率的に洪水が発生させる降雨パターンを引き延ばす必要がある。過去の洪水のピーク流量と12時間雨量をプロットし12時間雨量に対し、ピーク流量が大きい洪水を「効率的に洪水が起きるもの」として6つの洪水を選定した。さらに選定した洪水の発生した要因等の特徴の分析を行った。本章では、分析を踏まえて各雨量観測所の降雨波形、天気図、台風の経路を参考に物部川において効率的に洪水が発生する降雨分布を明らかにした。

### 3.2 12時間降雨量とピーク流量の関係に基づく危険な降雨分布の選定

想定最大外力の降雨波形は、過去の主要な洪水の降雨波形を想定最大規模降雨の降雨量と等しくなるように引き伸ばしを行い作成されている。そのため、想定最大外力である引き伸ばしの元となる時間的空間的降雨分布(以下、降雨パターン)の選定が重要である。過去の洪水の12時間雨量と洪水時のピーク流量を図3.1に示した。

図3.1より、同じ12時間雨量に対してピーク流量が洪水によって異なっていることが分かる。降雨パターンの違いによりピーク流量が異なると考えられる。そこで、12時間降雨量に対してピーク流量が大きくなる洪水を選定した。選定した洪水は赤色で示している。選定した洪水を表3.1に示した。

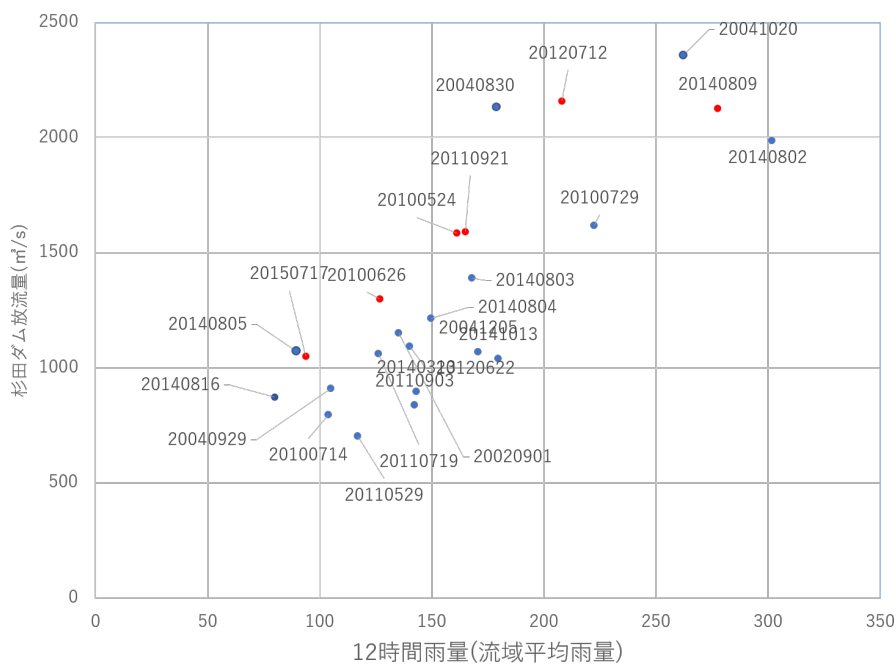


図 3.1: 洪水時における流域平均 12 時間雨量と杉田ダムのピーク流量

表 3.1: 選定した洪水

(a)	2010 年 5 月 24 日
(b)	2010 年 6 月 26 日
(c)	2011 年 9 月 21 日
(d)	2012 年 7 月 12 日
(e)	2014 年 8 月 10 日
(f)	2015 年 7 月 17 日

### 3.3 洪水を引き起こした降雨分布の特徴の整理

3.2.1 節から 3.2.8 節に洪水ごとの特徴を整理した結果を示した。

#### 3.3.1 (a)2010 年 5 月 24 日

低気圧の影響である。西日本上空に低気圧が配置され、暖かく湿った空気が流れこみ、大雨となった。また流域全体に降雨が発生していることが分かった。24

日の1時～6時の集中的な降雨がある前にだらだらと雨が降り続けているため、緑のダムの効果を使い果たしてしまった状態から降雨が始まっていると考えられ、流量が大きくなったと考えられる。また降雨強度を見ると時間が経つにつれて大きくなっているため、後方集中型の降雨波形でもあることが分かった。

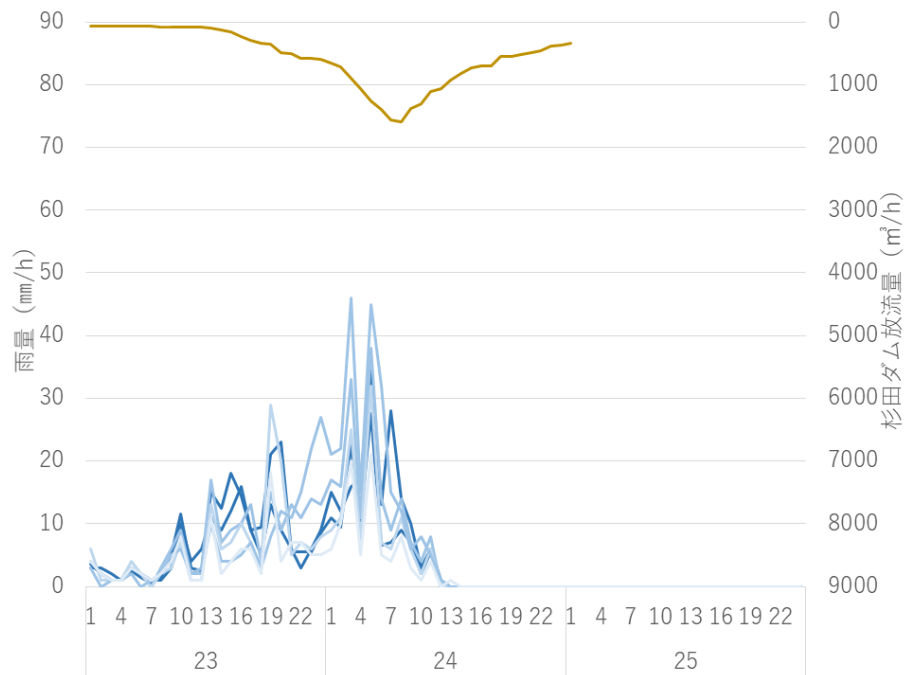


図 3.2: 2010年5月23日から25日における各雨量観測所の降雨波形

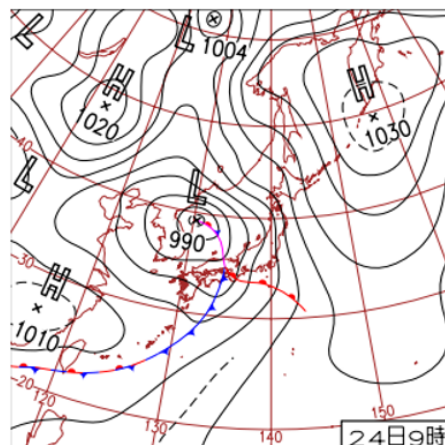


図 3.3: 5月24日の天気図

[6]

### 3.3.2 (b)2010年6月26日

流域の南側に低気圧があり、その影響である。空間的な降雨分布の違いがあまりなく流域全体にまとまった降雨があることが分かった。流域全体に降雨があり、ピーク流量が大きくなったと考えられる。

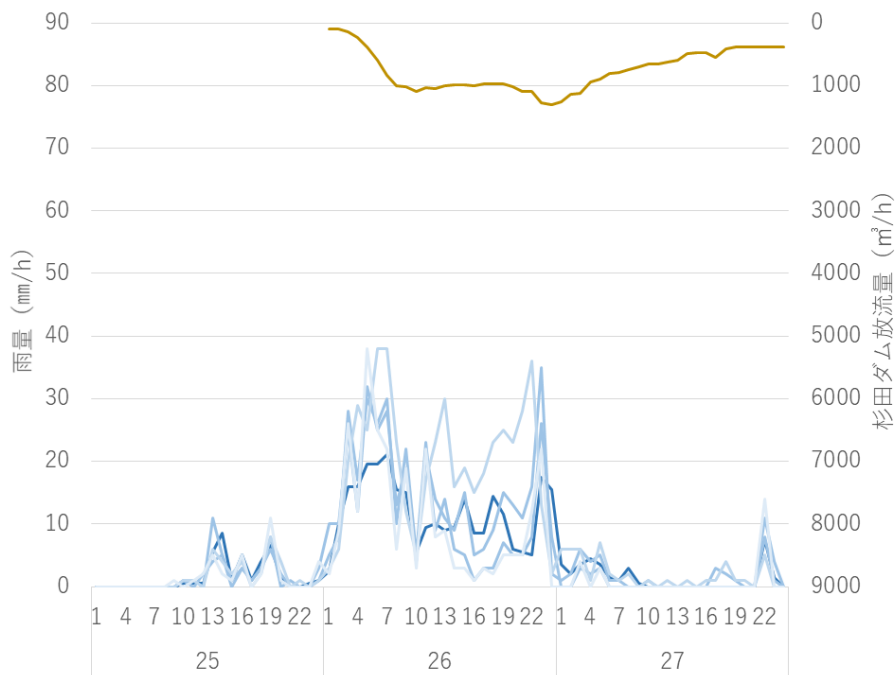


図 3.4: 2010年6月25日から27日における各雨量観測所の降雨波形

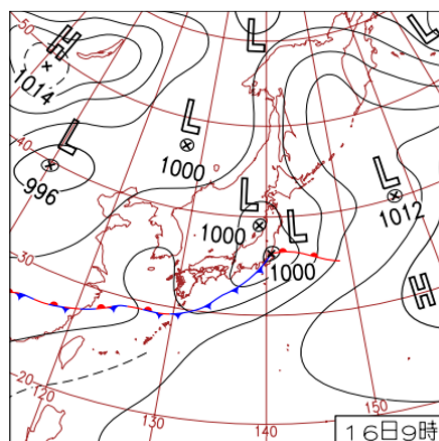


図 3.5: 6月26日の天気図  
[6]

### 3.3.3 (c)2011年9月21日

台風15号による影響である。台風の経路は流域の東側を北東方向に通過した。降雨波形から20日15時から上流側で降雨が観測されており、時間の経過に伴い中流から下流へと降雨が観測されている。台風が流域の東側を通過することにより、初めは台風の湿った空気が徳島県側から流域内に流れ込んでくる。流域に接近するにつれ、台風の湿った空気が流域内部にまで入り込み、中流域から下流域で降雨が発生する。先に上流で降った雨が洪水となり、その洪水の流下とともに、中流、下流での降雨と重なり、下流での流量が大きくなると考えられる。

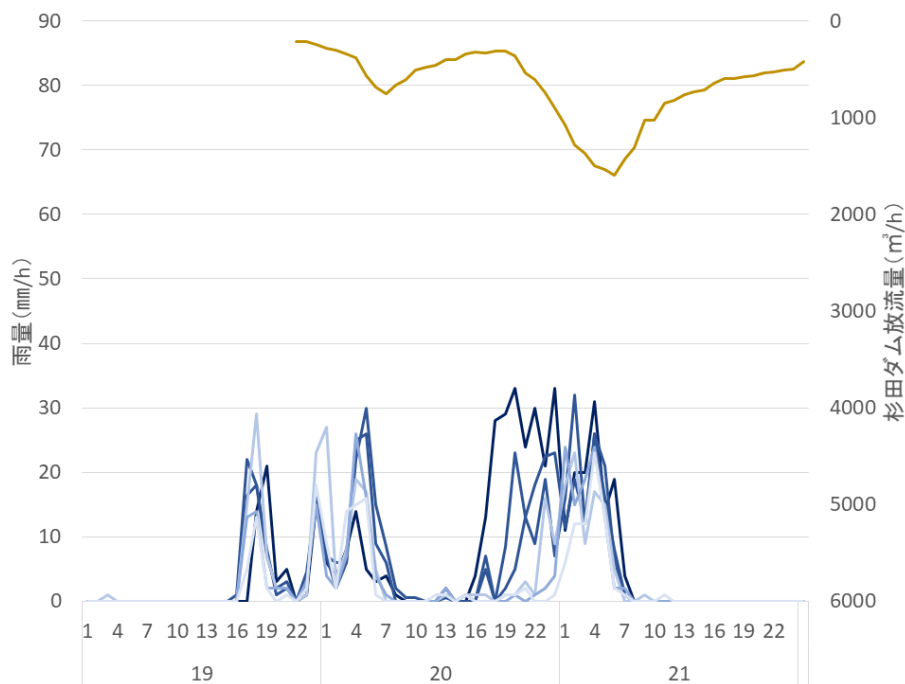


図 3.6: 2011年9月20日から22日における各雨量観測所の降雨波形

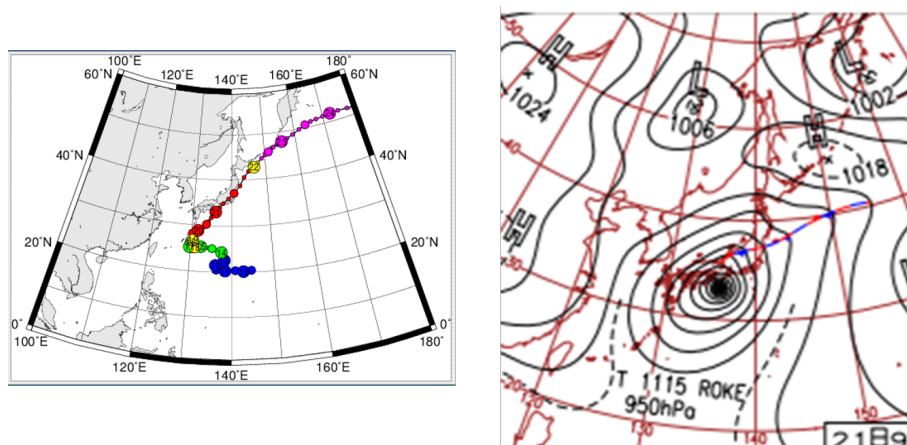


図 3.7: 9月21日の台風の経路と天気図

[6][7]

### 3.3.4 (d)2012年7月12日

梅雨前線の影響と南からの湿った空気の流入によるより、集中豪雨をもたらした。降雨波形を見ると、どの観測所も降り始め、降り終わりはほぼ同時刻である。南からの湿った空気により北側斜面の降雨強度が大きくなっている。上流北斜面の雨量観測では100mmを記録した。上流の雨量観測所の雨量強度が大きいことから (b)と同様に地形性降雨の影響であると考えられる。

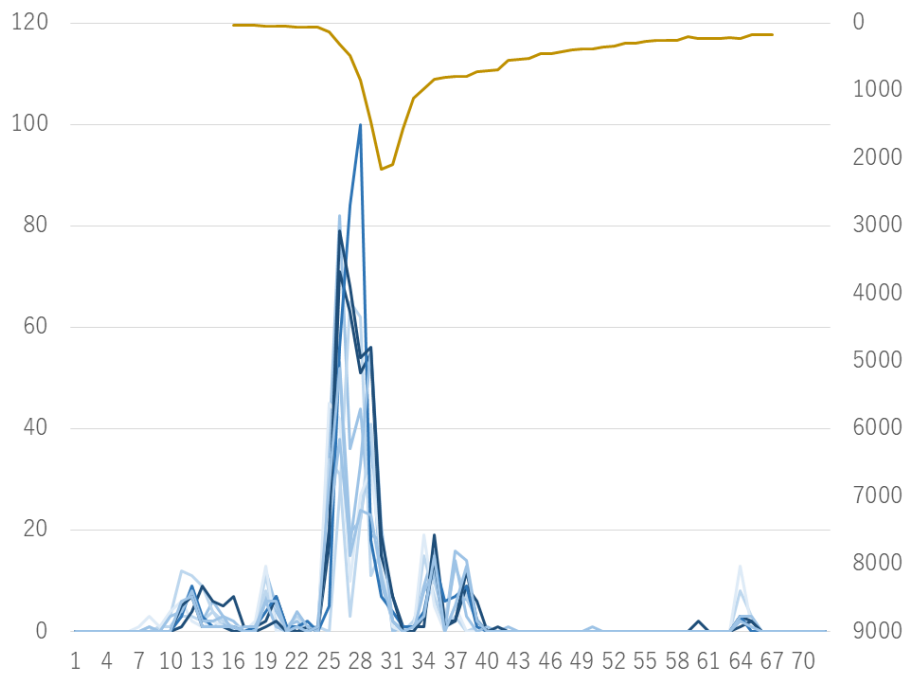


図 3.8: 2012 年 7 月 11 日から 13 日における各雨量観測所の降雨波形

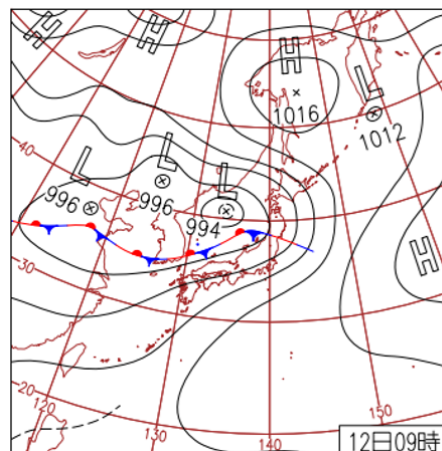


図 3.9: 7 月 12 日の天気図  
[6]

### 3.3.5 (e)2014 年 8 月 10 日

台風 11 号が流域の東側を北へ通過したため、( ) の洪水と同様に湿った空気が流域上流から流入し、始めに上流に雨を降らし、時間差で中流、下流へ雨を降らした。上流の降雨による洪水と下流の降雨が重なりピーク流量が大きくなったと考えられる。

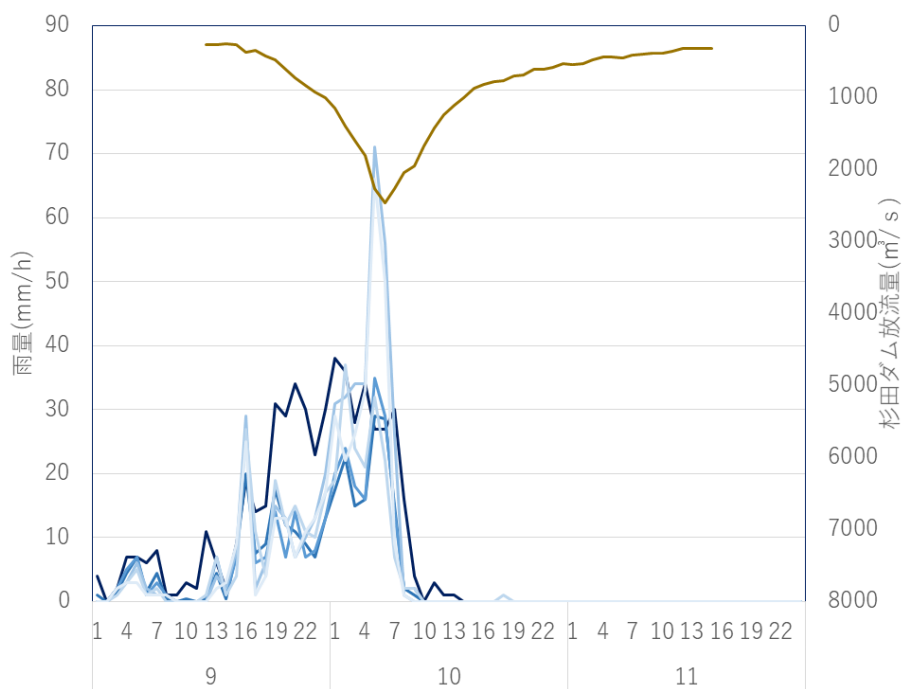


図 3.10: 2014 年 8 月 9 日から 11 日における各雨量観測所の降雨波形

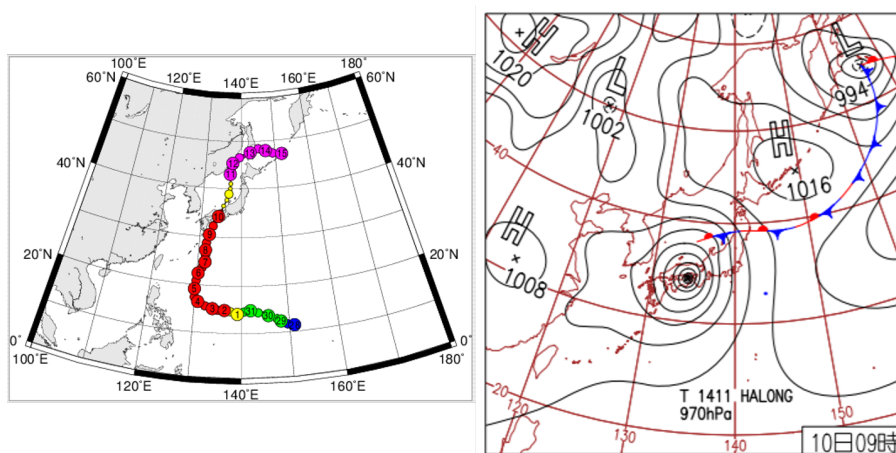


図 3.11: 8 月 10 日の台風の経路と天気図

[6][7]

### 3.3.6 (f)2015 年 7 月 17 日

台風 11 号の影響である。台風が流域の西側を通過しているため。湿った空気が流域に供給され雨を降らす。また地形性降雨により上流の雨が強いことが分かった。



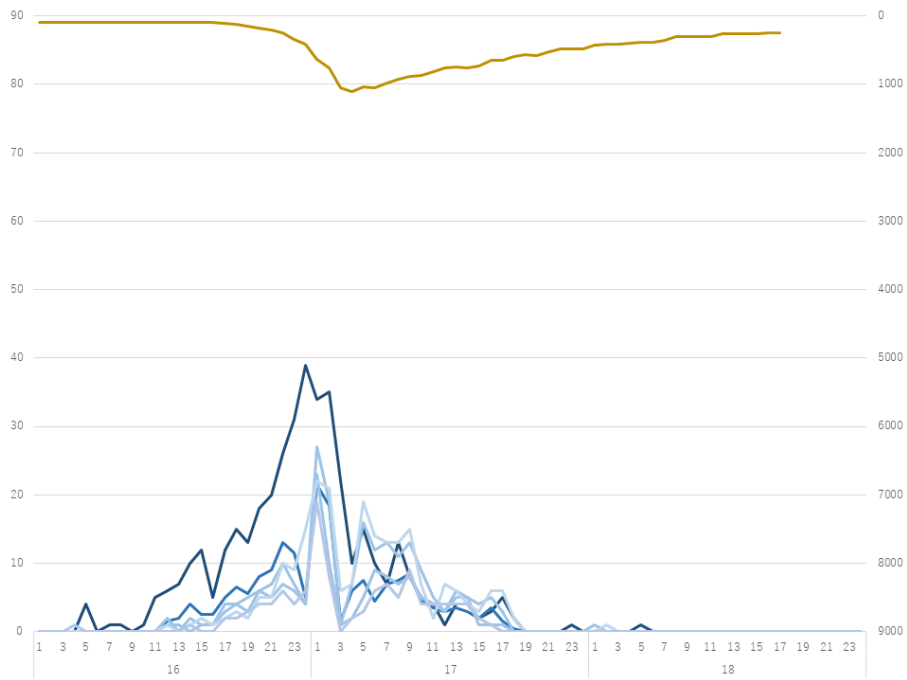


図 3.12: 7月16日から18日における各雨量観測所の降雨波形

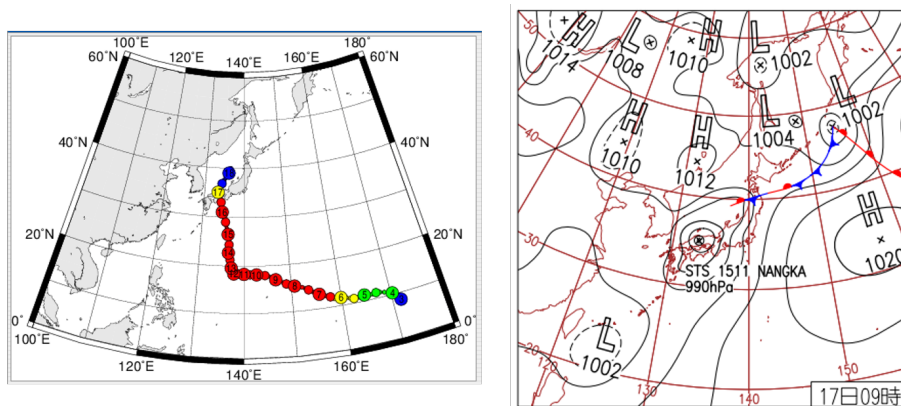


図 3.13: 2015年7月17日の台風の経路と天気図  
[6][7]

### 3.4 危険な降雨パターンの分類

3.3節において選定した洪水の発生要因の整理をふまえて、危険な降雨パターンを3種類に分類した。分類した結果を図3.14に示した。一つ目に(d)(f)のような地形性降雨により流域上流ほど降雨が強い降雨パターンを示した。二つ目に(a)(b)のような流域全体に雨が降るパターンを示した。三つ目に(c)(e)のような流域の

上流から下流へ降雨が移動するパターンを示した。降雨波形の時間分布に着目すると、(a)(c)は後方集中型であることが分かった。

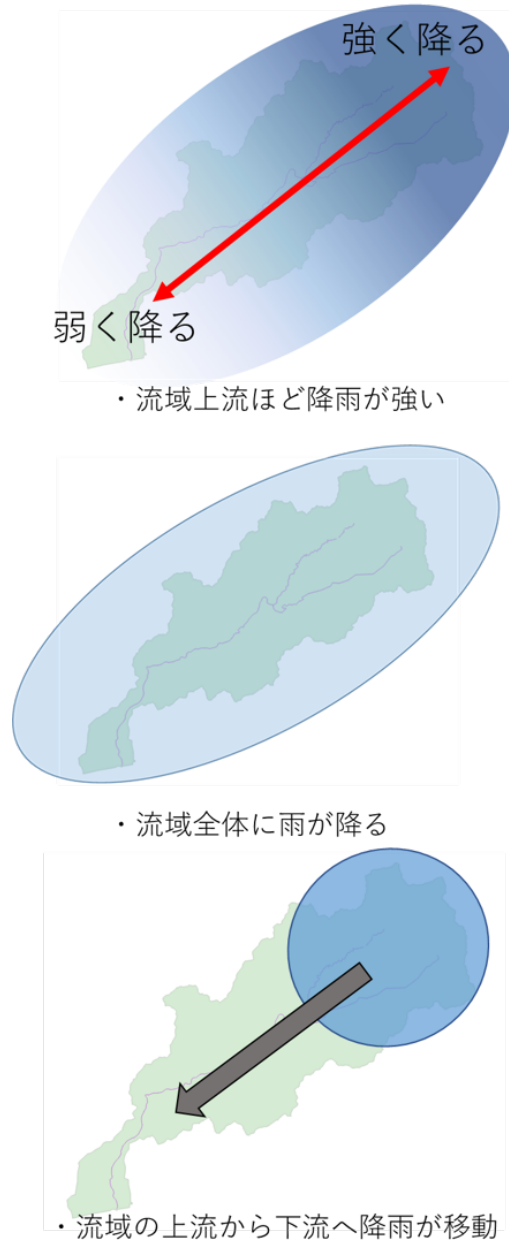


図 3.14: 危険な降雨分布の分類

### 3.5 まとめ

想定最大外力を検討する際、過去の主要な洪水のみを用いて検討するのではなく、小雨量であっても、効率的に洪水が発生させる降雨パターンを引き延ばす必

要がある。12時間雨量に対して大規模な洪水を発生させる降雨パターンの選定を行い、選定した降雨パターンの発生要因の整理及び降雨パターンの分類を行った。



## 第4章 ディープラーニングによる水位モデルの構築

### 4.1 ディープラーニングとは

近年、人工知能 (AI) の発展が著しい。AI のカギとなっているのが機械学習と呼ばれる手法であり、特にディープラーニング (深層学習)<sup>1)</sup> という新しい学習手法の登場により技術革新が急激に進んでいる。ディープラーニングの特徴として、学習モデル自らが、大量の入力データの中から本質的な情報の抽出を行うことが挙げられる。ディープラーニングは、画像認識や音声認識、自然言語処理など様々な分野で研究が進んでいる。

流出解析を行う際、従来の物理モデルの特徴として、地形や地層、気象等の膨大な入力データが必要であることやプログラムが複雑であること、パラメーターの設定が必要であることなど、専門的な知識が要求される。一方、ディープラーニングによるモデル構築であれば、学習データと教師データから特徴抽出を行っているため、物理モデル作成において必要な作業を大幅に省略が可能であり、流出解析モデルを作成することができる。

### 4.2 ディープラーニングによるモデルの構造

これまでに様々な構造のニューラルネットワークが提案されている。本研究では最も一般的な階層型ニューラルネットワークを用いた。階層型ニューラルネットワークは図 4.1 のように入力層・中間層・出力層で構成される。活性化関数は様々な関数が使われるが、本研究では relu 関数を用いて、パラメータベクトル  $w$  を求め、モデルを構築した。

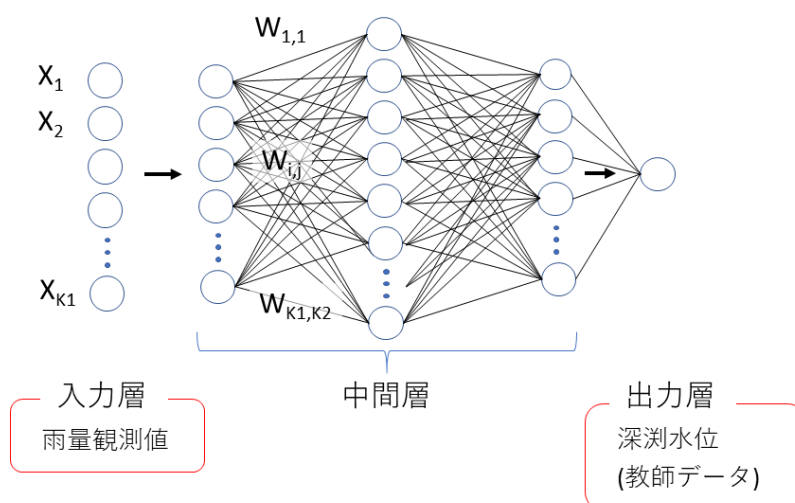


図 4.1: ニューラルネットワークの構造

### 4.3 学習に使用するデータの特徴

深淵の水位を推定するにあたり、まずは水位を決める要因を明らかにしておく必要があり、以下のことが考えられる。

- ・ 流域内の降雨による表面流の影響
- ・ 地下水の流出による基底流量の影響

表面流の影響は降雨によるものと考えられるため降雨の時系列データを用いる。また地下水の基底流量については、降雨がありその雨が地面にしみこみ、長い時間をかけてゆっくりと河道に流れ出すため長期間の雨量のデータから表現できると考え、長期の雨量のデータを用いて水位を推定することとした。

本研究で物部川流域内 11 箇所の雨量観測所の 1 時間データと深淵の 1 時間ごとの水位データを用いる。雨量観測所と水位観測所の位置を図 4.2 に示した。

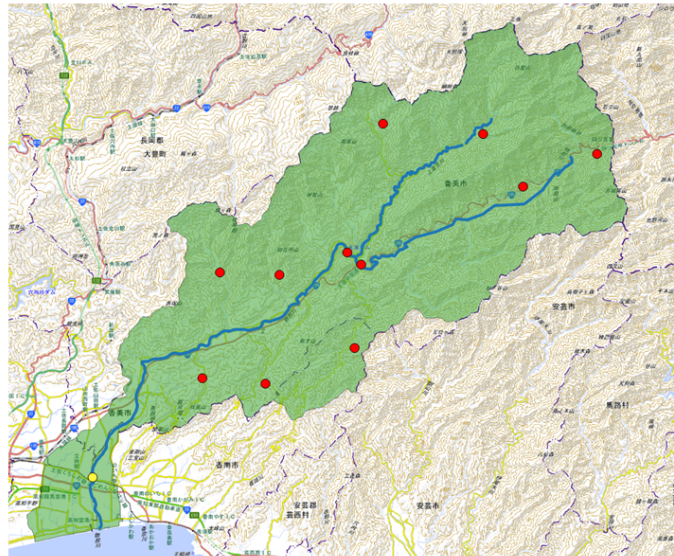


図 4.2: 雨量観測所と水位観測所の位置

#### 4.4 モデル構築に使用可能なデータ

図 4.3 に 2008 年から 2017 年までの深淵の水位の推移を示した。物部川は洪水のたびに土砂が上流から運ばれ下流に堆積を繰り返しており、また流下能力の向上を目的として河道の掘削などが行われており、深淵の地点の河床が変化している。河床変化前のデータを学習に用いると正しくモデル構築を行うことができないため、現在の河床とほとんど変化が見られない 2014 年 12 月 25 日からのデータを用いてモデルを構築することとする。モデルの精度を確認するために 2015 年から 2017 年の 3 年間を学習データとしてモデルを構築し、2018 年 1 月から 7 月 15 日までのデータを用いて検証を行うこととする。

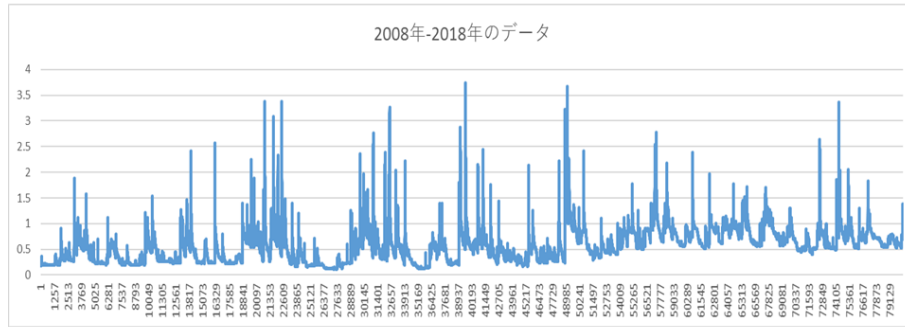


図 4.3: 雨量観測所と水位観測所の位置



## 第5章 最適なモデル構築に向けて学習に必要な雨量データの設定

物部川、深淵の水位モデルの作成を行った。説明変数を雨量、非説明変数を水位とした。ある時刻  $t$  の水位に対して、 $t$  時から過去  $x$  時間の雨量が影響していると考えた時、 $t-x$  時から  $t$  時までの雨量データをデータセットとして作成した。作成例を以下に示した。例では過去の約1年分の雨量が水位に影響していると考え、時刻  $t$  の水位に対して  $t-8208$  (約一年) 前から  $t$  時の期間でデータセットを作成している。ある時刻  $t$  に対して過去 288 時間は 1 時間データで、それよりも過去のデータは 30 日平均で設定している。学習に用いる使用可能な水位のデータは 2014 年 12 月 25 日の 1 時から 2017 年 12 月 31 日 24 時までのデータとし、2018 年 1 月 1 日 1 時から 2018 年 7 月 16 日 1 時までの期間でテスト (評価) を行った。

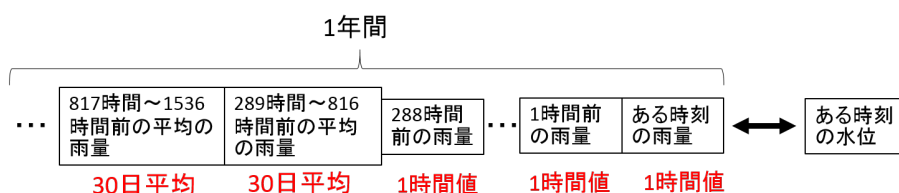


図 5.1: データセットの作成例

### 5.1 モデルの構築の課題

水位モデルの構築を行うためには二つの課題があった。一つ目は学習する雨量データ量の検討である。深淵の過去の水位をモデル化するために必要な雨量のデータ量はどれ程が適切であるか検討を行う必要がある。これを 5.2 節に示した。二つ目は雨量データの分解能の設定である。ある時刻の水位に対して、ある時刻の直近の雨量から遡った過去の雨量を学習する際に、分解能の設定によりモデルの精度はどのような影響があるのか考える必要がある。これを 5.3 節に示した。

## 5.2 学習に用いる雨量データ量の検討

物部川の基底流量をモデル化するために必要な雨量データの量についての検討を行った。短期雨量時系列の場合と長期雨量時系列の場合を比較して感度解析を行った。時系列データの長さを以下に示した。

- ・ 12 時間
- ・ 8208 時間 (約 1 年)

なお、時系列長が 8208 時間においてはデータ量が膨大であるため任意の時間の平均値を算出し、分解能を低くした上で学習を行った。推定時刻から過去 96 時間までは 1 時間分解能、過去 97 時間以降は 30 日平均とした。各時系列長のモデルの推定結果を図 5.2 に示した。

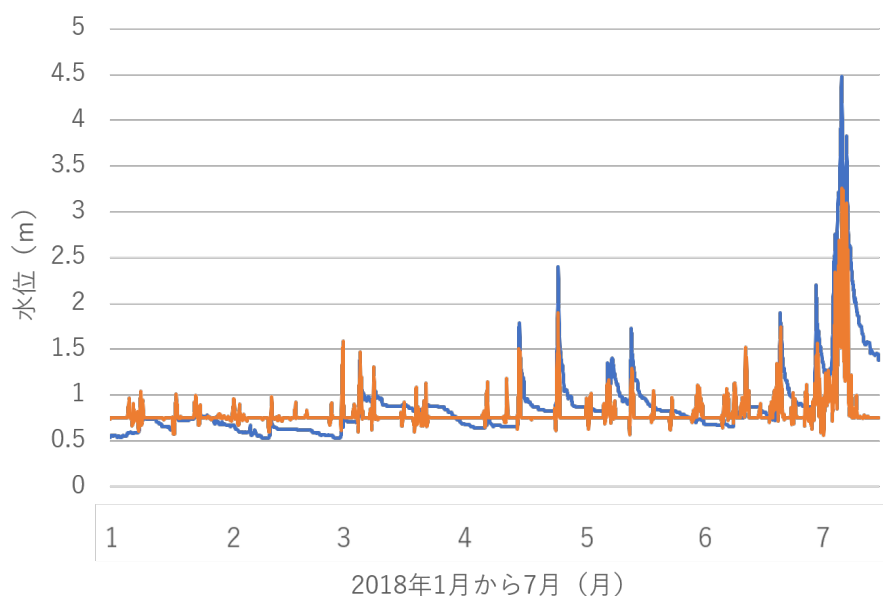


図 5.2: 短期雨量時系列における実測値と推定値の推定結果

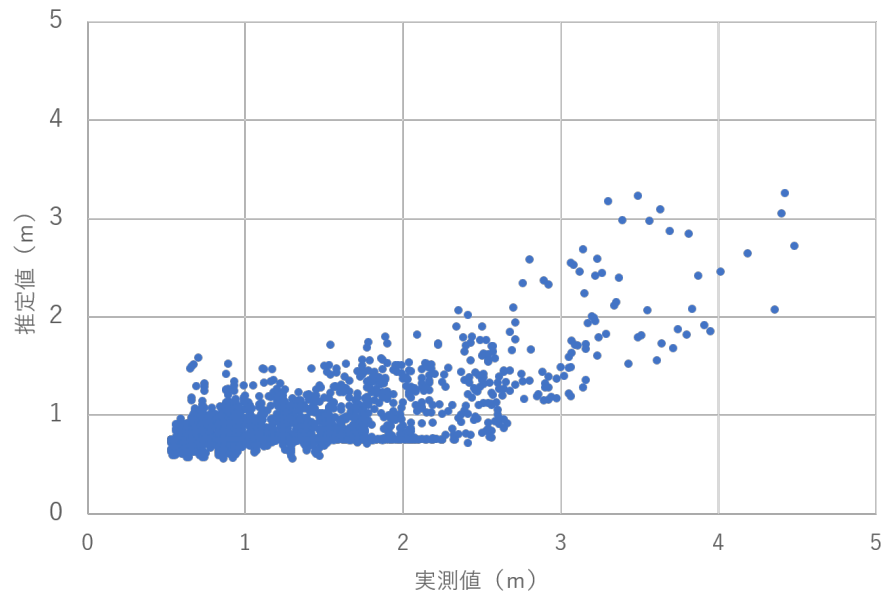


図 5.3: 短期雨量時系列における実測値と推定値の散布

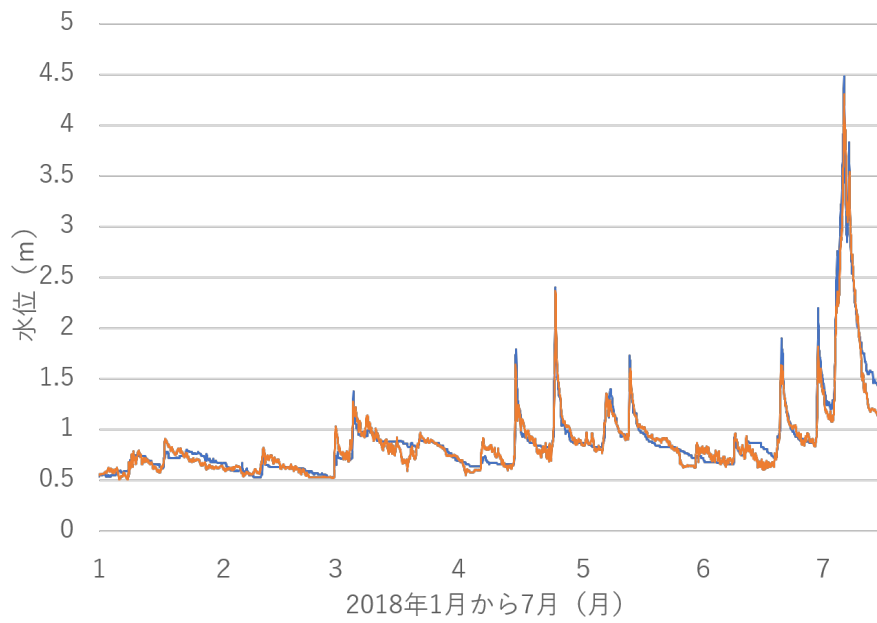


図 5.4: 長期雨量時系列における実測値と推定値の推定結果

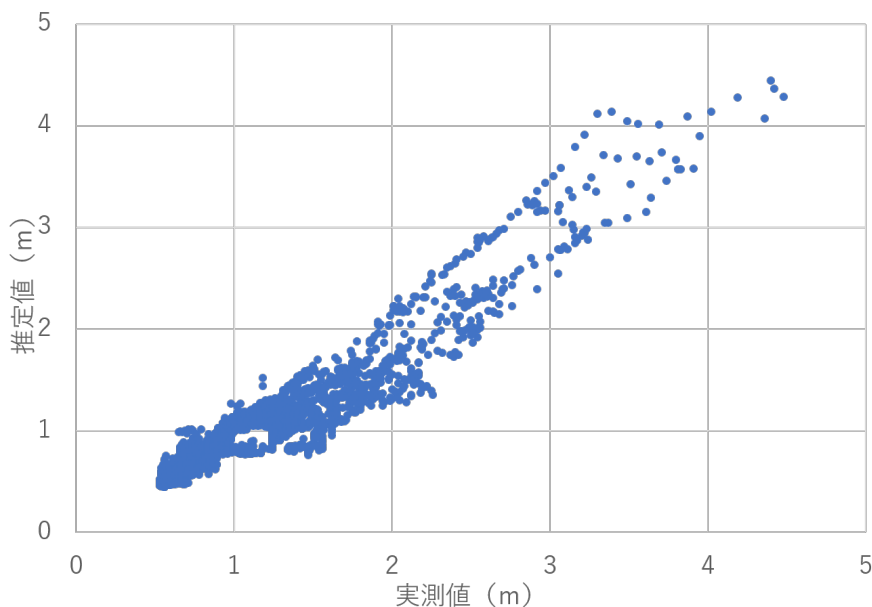


図 5.5: 長期雨量時系列における実測値と推定値の散布

図 5.2 より、短期時系列において低水位時に実測値と推定値に差があることが分かった。低水位時の推定値は約 0.75m を一定に示しており、低水時の水位を再現できていない。また洪水時も実測値と推定値に大きな差があることが分かった。長期時系列の場合、洪水時が精度よく推定できていることが分かった。長期時系列を学習させることにより、洪水を再現するために必要な雨量データが学習されたため、実測値と推定値が近くなったと考えられる。また、低水時は実測値と推定値に差があることが分かった。低水時の検討は 5.3 の雨量データの分解能の検討で行った。

### 5.3 学習に用いる雨量データの分解能の検討

5.2 節の結果より 1 年程度の雨量データが必要であることが分かった。ある時刻の水位に対して近い時間は、ある時刻の水位に対しての影響が大きいと判断して 96 時間までは 1 時間分解能でデータを作成し、96 時間よりも過去の雨量については 720 時間 (1 ヶ月) 平均としてデータ量を圧縮した。表面流を現す 1 時間雨量の長さ、平均雨量の適切な間隔を見つける必要がある。前項では 1 時間時系列の長さを 96 時間 (4 日) と、平均雨量の期間を 720 時間 (1 ヶ月) としてモデルを作成した。1 時間時系列の長さ、平均雨量の期間を変化させて感度解析を行った。以下のパラメータを設定し、それぞれの組み合わせで解析を行った。

1時間時系列の長さ(時間)	12	96	288	576	1152		
平均雨量の間隔(時間)	6	12	24	96	240	480	720

図 5.6: 1 時間時系列の長さや平均雨量の間隔のパラメータ

まず、1 時間時系列の 96 時間と 30 日平均雨量で作成したモデルの推定結果と、1 時間時系列 288 時間 (12 日) と平均雨量の期間を 30 日平均雨量で作成したモデルの推定結果を以下に示した。



図 5.7: 1 時間時系列 96 時間の推定結果

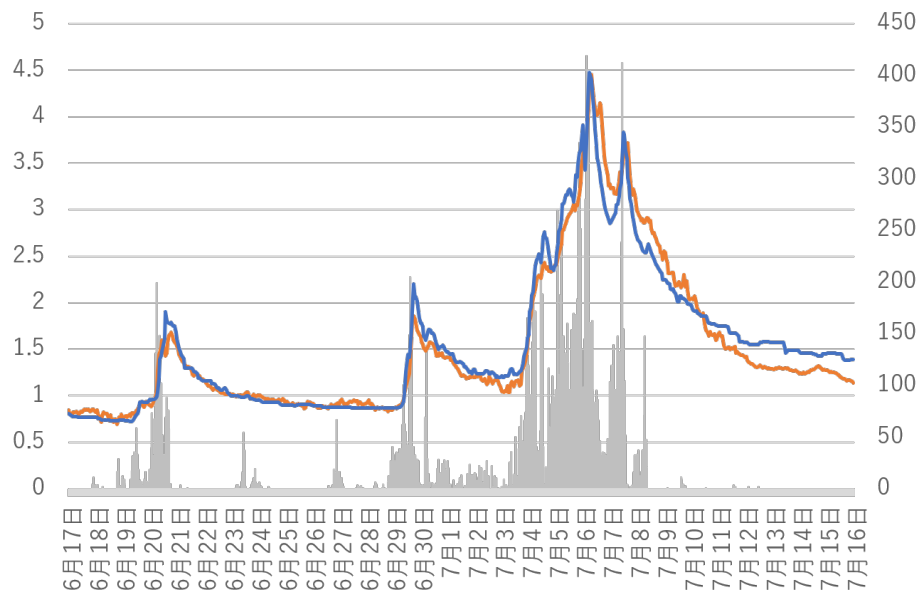


図 5.8: 1 時間時系列 288 時間の推定結果

2018 年の 6 月 17 日から 7 月 15 日までを推定した図 5.7、図 5.8 において、青線に実測値、橙線に推定値、灰色の棒グラフに流域平均雨量を示した。図 5.7 について、1 時間時系列 96 時間の推定結果を示した。洪水時は概ね再現できているが低水位の水位が実測値とずれていることが見てわかる。特にまとまった降雨があった約 96 時間後に低水位が大きくずれていることが分かる。図 5.8 について、96 時間の 1 時間時系列のモデルの推定結果と比較して低水位の推定値が実測値に近くなっていることが分かった。1 時間時系列は表面流を再現しており、過去の時系列データは地下水を再現している。96 時間から 288 時間に 1 時間時系列の長さを長くすることによりモデルの精度が上がったことから、洪水時における表面流の影響は、深淵地点の水位に約 288 時間の影響時間があるということが分かった。

続いて、1 時間時系列が 288 時間と 30 日平均雨量で作成したモデルと、1 時間雨量時系列 288 時間と 20 日平均雨量で作成したモデルの推定結果を比較した。



図 5.9: 平均雨量の間隔 30 日の推定結果

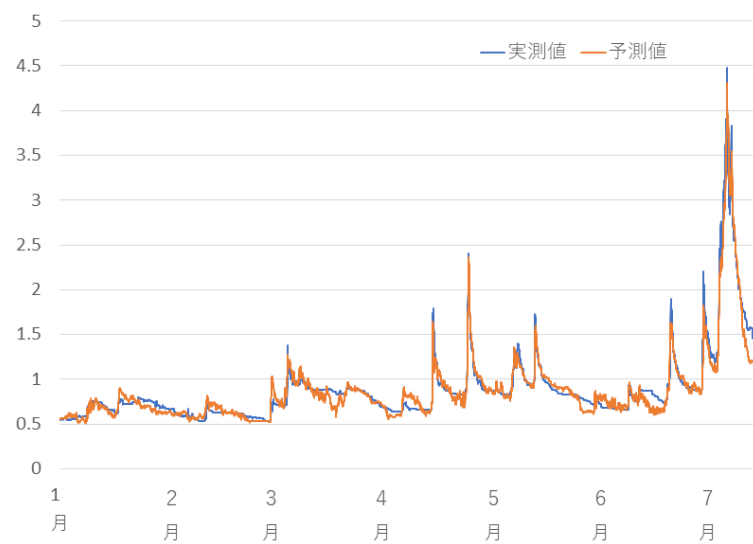


図 5.10: 平均雨量の間隔 20 日の推定結果

2018年1月1日から2018年7月15日までを推定した。洪水時の推定結果はどちらもよいが、低水位の再現結果が、20日平均雨量のモデルの方が実測値と近かつ

た。30日平均雨量から20日平均雨量へ変更することで、モデルの精度が向上した理由は以下のことが考えられる。例えば、図5.11のような降雨波形が過去に存在したとする。この降雨波形を20日平均雨量と30日平均雨量で表現すると、図5.12のようになる。

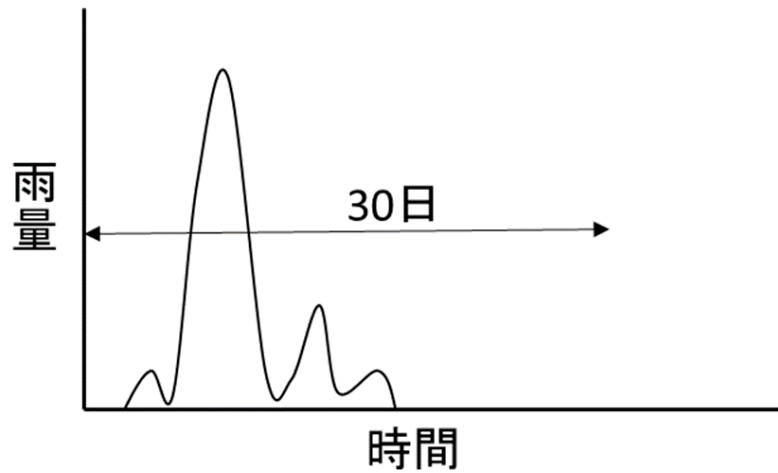


図 5.11: 仮想的な降雨波形



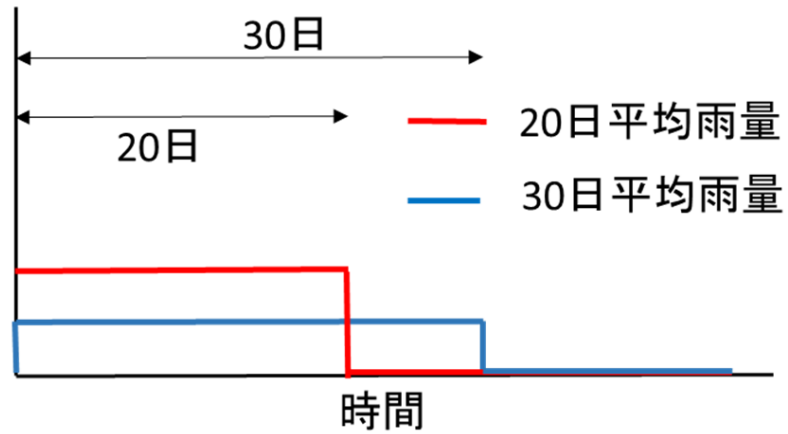


図 5.12: 平均化した降雨波形

30日平均雨量では、降雨現象が起きていなかった時も降雨があると判断してしまい、低水位が一致しなかったと考えられる。

各パラメータの、それぞれの組み合わせで解析を行った結果のRMSE値を図5.13に示した。

RMSE(m)		1時間時系列の長さ				
		12	96	288	576	1152
平均雨量の期間	6	0.13	0.11	0.093	0.091	0.099
	12	0.12	0.11	0.085	0.078	0.090
	24	0.12	0.10	0.075	0.078	0.083
	96	0.096	0.087	0.073	0.072	0.077
	240	0.097	0.094	0.072	0.072	0.073
	480	0.12	0.099	0.068	0.072	0.073
	720			0.078		

図 5.13: 複数の水位モデルの RMSE 値

1時間時系列を見ると、288時間より長く設定すると RMSE 値が小さくなるわけではないことが分かった。このことから、1時間時系列が表面流への影響を与えることと仮定すると、洪水時の表面流を再現するには、およそ 288 時間が適していることが分かった。1時間時系列の長さを、さらに長期間の値に設定するとノイズデータが増え、精度が落ちたと考えられる。

平均雨量の間隔を短くし、高分解能に設定しすぎても精度が落ちている。平均雨量の間隔を 480 時間で行った結果を図 5.15 に、平均雨量の間隔を 6 時間で行った結果を図 5.14 に示した。平均雨量を高分解能で行うと低水位の時に細かい推定結果が、細かく振動しているのが分かった。過去に降った少量の雨にも敏感に反応し、精度が落ちる結果となったと考えられる。

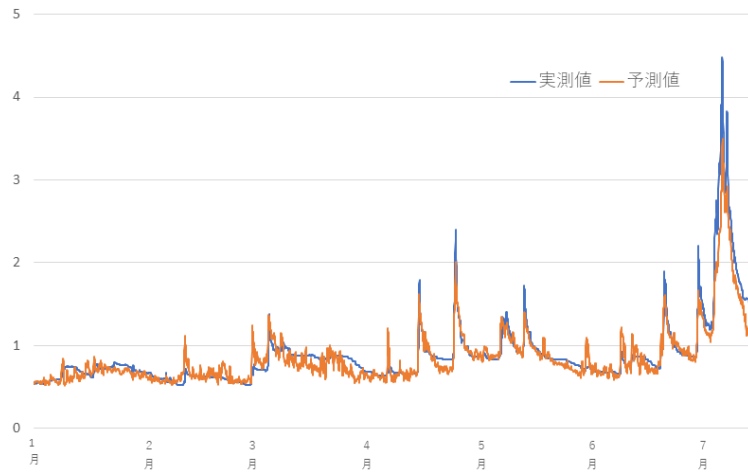


図 5.14: 平均雨量の間隔 6 時間

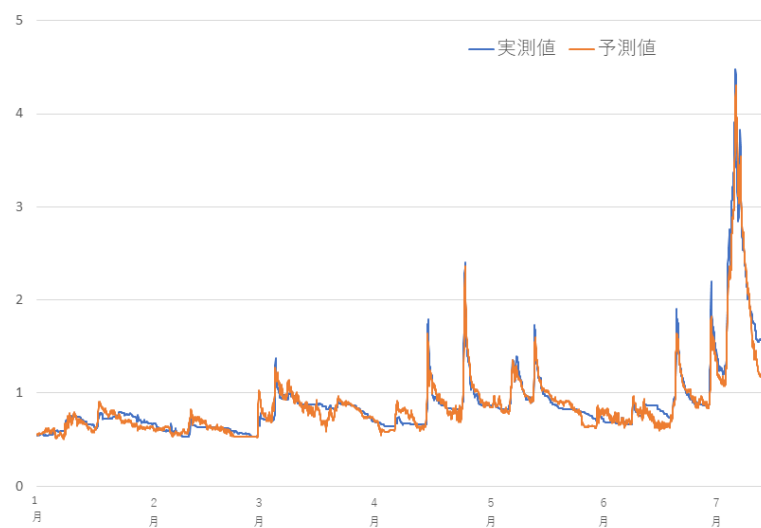


図 5.15: 平均雨量の間隔 480 時間

RMSE(m)		1時間時系列の長さ				
		12	96	288	576	1152
平均雨量の 期間	6	0.13	0.11	0.093	0.091	0.099
	12	0.12	0.11	0.085	0.078	0.090
	24	0.12	0.10	0.075	0.078	0.083
	96	0.096	0.087	0.073	0.072	0.077
	240	0.097	0.094	0.072	0.072	0.073
	480	0.12	0.099	0.068	0.072	0.073
	720			0.078		

図 5.16: 平均雨量の間隔 6 時間

## 5.4 まとめ

モデル構築を行うために2つのパラメータ設定を行った。モデルを作成するために適切な雨量データ量の設定と雨量データの分解能の設定が必要であることが分かった。1時間時系列 288 時間、平均雨量間隔 480 時間のパラメータで作成したモデルの RMSE 値が最も小さかったため、本研究では学習させるモデルの分解能は 1 時間時系列 288 時間、平均雨量間隔 480 時間に決定した。

## 第6章 想定最大外力(降雨)の導出方法の検討

### 6.1 国土交通省が提示している想定最大外力の考え方

国土交通省が公開している「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」において基本的な考え方として、想定最大規模降雨の降雨量については、それぞれの地域において観測された最大の降雨量(地域ごとの降雨量)により設定することを基本とする。全国を15の地域に分割しており、物部川は、四国南エリアに分類される。当該降雨を設定しようとする河川の面積や降雨継続時間により想定最大規模降雨を決定することができる。想定最大規模降雨の降雨波形については主要な洪水の降雨波形等を想定最大規模降雨の降雨量に等しくなるように引き伸ばしたもののうち、氾濫した際の被害が最大になると考えられることを基本としている。

### 6.2 降雨波形の引き伸ばしの検討と引き伸ばしを考慮した降雨波形の作成

降雨波形を想定最大規模降雨の降雨量に引き伸ばす際に、複数のシナリオが考えられる。各シナリオの特徴を以下に示した。

- (i) 流域平均雨量が想定最大規模の降雨量になるように引き伸ばし倍率を決定し、各雨量観測所の降雨波形を引き伸ばす方法である。この手法の長所は、実際に存在した降雨の時間的・空間的な降雨分布の関係をそのまま維持できることである。短所は観測所によって、想定最大規模降雨の単位時間のあたりの降雨量を超えることである。短時間に局所的な豪雨が観測された降雨波形を引き伸ばした際に、短時間の想定最大規模の降雨量を大幅に超過する可能性がある。
- (ii) 想定最大規模降雨の降雨量を超えない範囲で想定最大外力の降雨波形を作成することは合理性がある。そのため、(i)で作成した降雨波形に対して、降雨継続時間別、面積別に最大となる降雨量を超過しないように超過部分の降雨量を減少させて、降雨波形を作成した。降雨分布の関係性を崩さずに、物

理的限界の降雨量に収めることができ、想定最大規模の降雨量の範囲に収まる。しかし、12時間の流域平均雨量が、想定最大規模降雨の降雨量よりも小さくなるため過小評価の可能性はある。

- (iii) 各雨量観測所の12時間雨量が、想定最大規模降雨の降雨量になるように引き伸ばしを行う方法である。物部川の深淵地点における想定最大規模降雨の12時間の降雨量は681mmであるため、各雨量観測所の12時間雨量を681mmになるように引き伸ばしを行った。この手法の長所は、各雨量観測所において引き伸ばし倍率を決定しているため、想定最大規模の降雨量を大幅に超過する降雨波形が作成されないことである。短所は、選定した洪水時の降雨の空間的分布の関係を崩してしまう。また、単位時間当たりの想定最大規模降雨の降雨量を超過する可能性がある。
- (iv) (iii)で作成した降雨波形に対して(ii)の手法と同様に、単位時間あたりの想定最大規模の降雨量を超過しないように超過した降雨量を減少させて降雨波形を作成した。この手法の長所は、(iii)の短所であった、単位時間あたりの想定最大規模の降雨量の範囲内に収めることができることである。短所は選定した洪水時の降雨の空間的分布の関係を崩していることであり、また12時間の想定最大規模の降雨量681mmよりも小さくなるため、過小評価の可能性はある。

### 6.3 想定最大規模降雨の降雨量に基づく人工降雨波形の作成

3.3節において、危険な降雨分布の特徴の整理を行った。3.3.1節で示した(b)の洪水は流域均一に雨が降っている。物部川の流域面積は約 $504\text{km}^2$ では、流域全体に均一な降雨が発生する可能性がある。想定最大規模降雨から得られる単位時間当たり最大の降雨が流域均一に起きる可能性があるとして人工的に降雨波形を作成した。また時間的分布を考慮する際、人工降雨波形は前方集中型、中央集中型、後方集中型の3種類を作成した。降雨波形は以下に示した。

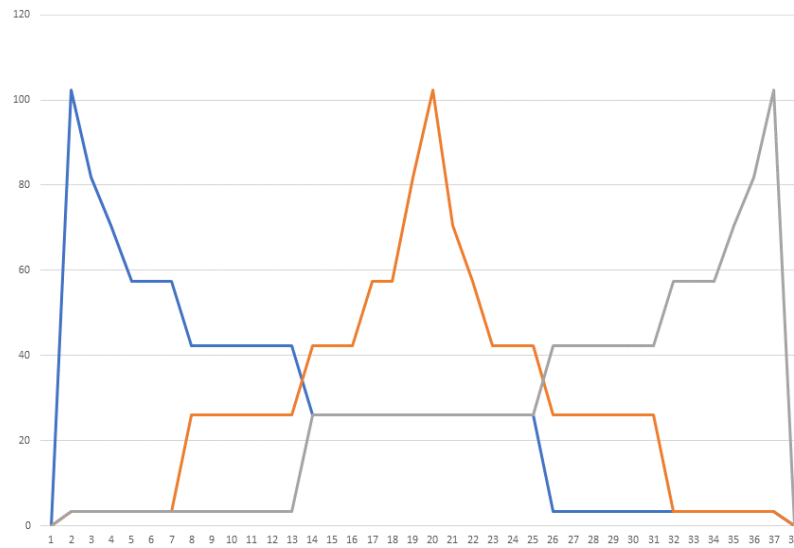


図 6.1: 前方・中央・後方集中型の降雨波形

## 6.4 引き伸ばし後の降雨波形と人工降雨波形の特徴の比較

作成した引き延ばし検討シナリオの特徴を、「時空間的な分布の関係」、「過小評価の可能性の低減」、「想定最大規模降雨の制限値に入っているか」の3項目について表にまとめた。過去の洪水時の降雨の時空間分布を反映できているのは (i) (ii) である。過小評価の可能性の低減は (i) (iii) (v) である。想定最大規模降雨の単位時間当たりの降雨量以下のものは (ii) (iv) (v) である。

表 6.1: 作成した降雨波形の特徴の比較

	時空間的な分布の関係	過小評価の可能性の低減	制限値以下
(i).流域平均雨量から引き延ばし倍率を決定	○	○	×
(ii). (i)の制限	元の波形の特徴を維持	×	○
(iii).各雨量観測所ごとに引き延ばす	×	○	×
(iv). (iii)の制限	×	過小評価になりそうな波形は少ない	○
人工降雨波形	×	○	○

## 6.5 まとめ

想定最大規模降雨の降雨量になるまで引き延ばしを行う時に、流域平均で考えるシナリオと、各雨量観測所ごとで考えるシナリオと、想定最大規模降雨の単位時間当たりの降雨量から降雨波形を作成するシナリオを検討した。各シナリオの特徴の整理を行った。



## 第7章 水文モデルへの想定最大外力の適応結果と考察

### 7.1 水文モデルへの想定最大外力の適応結果

第6章で検討を行った想定最大外力導出のシナリオを第3章で選定した物部川の危険な降雨波形に適応させ、結果の比較を行う。流出解析結果は以下に示した。物部川の危険な降雨波形8個と、前方、中央、後方集中型の人工降雨波形と、国土交通省が物部川で作成した想定最大降雨の流出解析を行った。結果を図7.1に示した。横軸に選定した洪水の日時、横軸に複数のシナリオで引き延ばした降雨パターンの推定ピーク水位を示した。前方集中型は約5m、中央集中型は約6m、後方集中型は約6.8mであった。すべての推定結果において水位が最も高くなったのは2014年8月の洪水を引き延ばした降雨パターンであった。

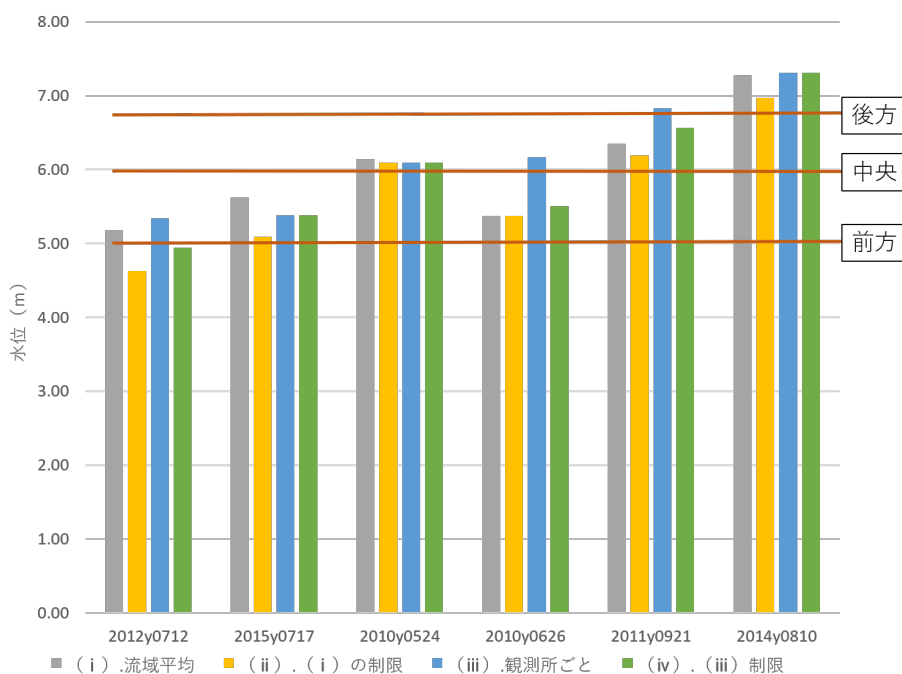


図 7.1: 各シナリオ結果による推定結果

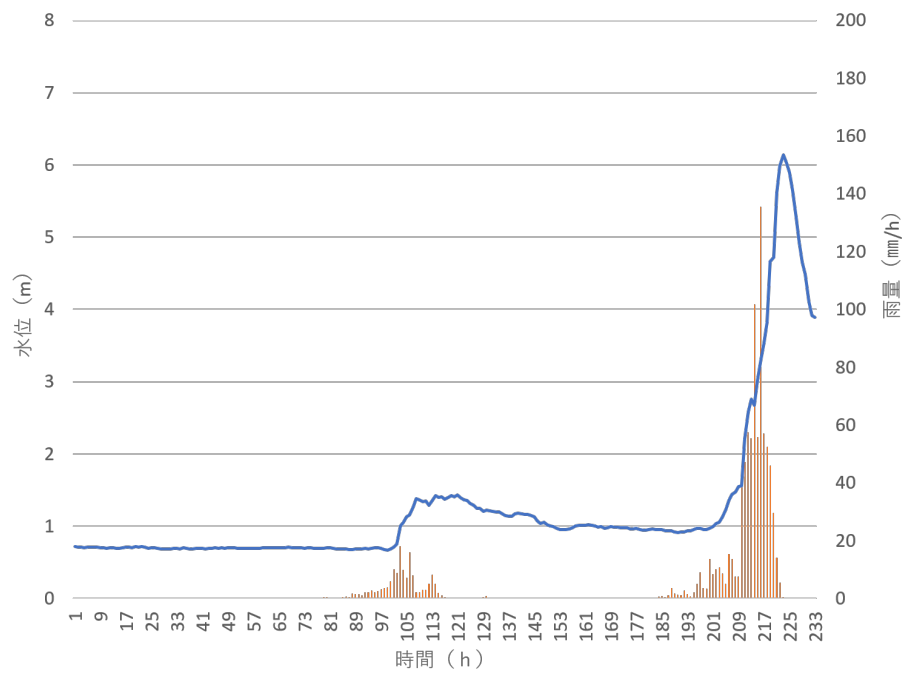


図 7.2: 2010年5月の洪水の推定水位 (シナリオ (ii) による引き延ばし)

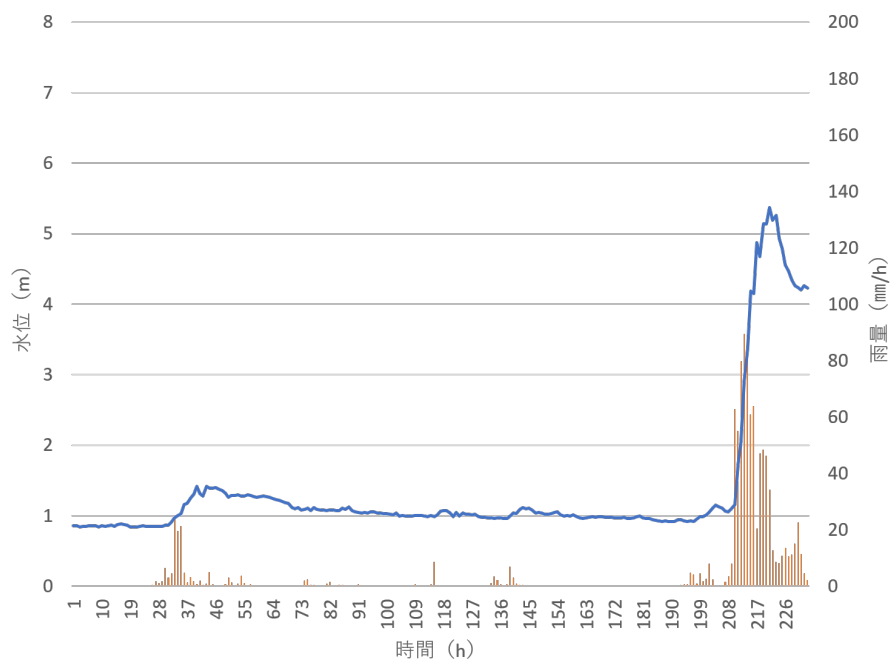


図 7.3: 2010年6月の洪水の推定水位 (シナリオ (ii) による引き延ばし)

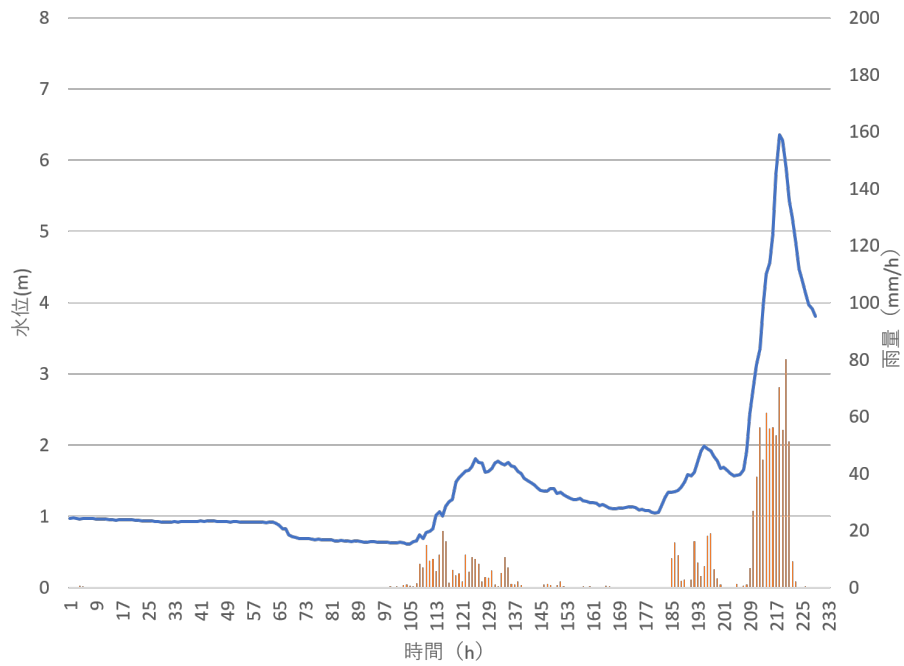


図 7.4: 2011 年 9 月の洪水の推定水位 (シナリオ (ii) による引き延ばし)

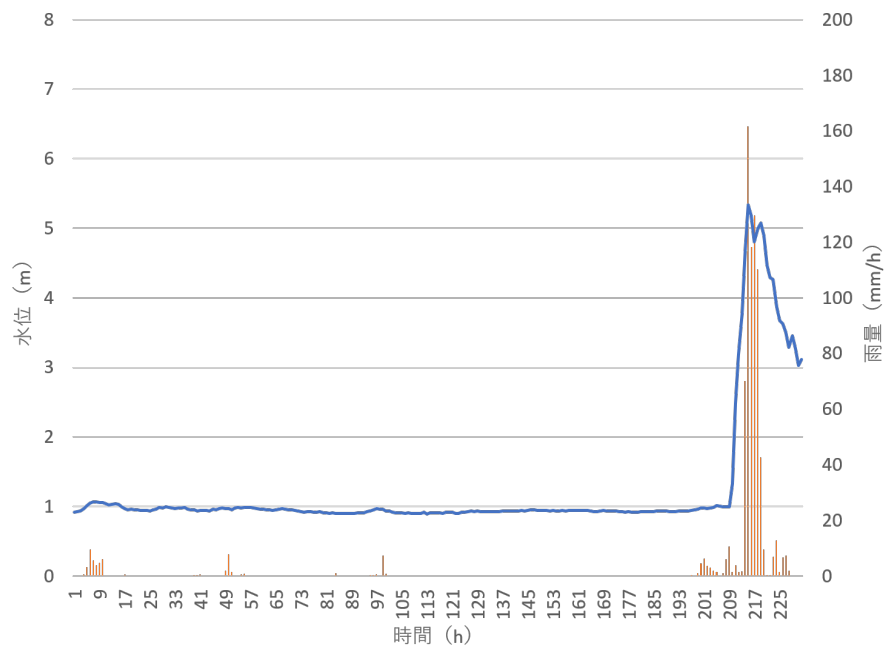


図 7.5: 2012 年 7 月の洪水の推定水位 (シナリオ (ii) による引き延ばし)

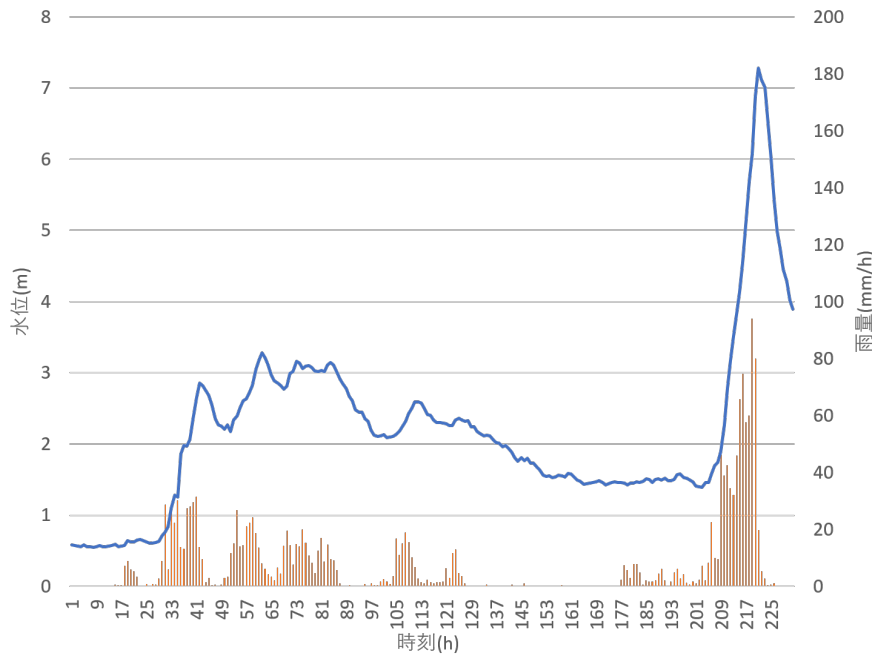


図 7.6: 2014 年 8 月の洪水の推定水位 (シナリオ (ii) による引き延ばし)

## 7.2 考察

2014 年の洪水と 2011 年の洪水は推定水位が高い結果となった。これは、引き延ばされた降雨 (209~221 時間) が発生する直前の降雨の影響を受けていたためであると考えられる。また、直前の降雨の影響により水位がすでに高い状況から、12 時間雨量 681mm の降雨が発生したため、推定ピーク水位が高くなったと考えられる。図 7.6 より、1~25 時までの水位は 0.7 m 程度であるが、129 時から 177 時までの間は雨が観測されていないが、水位が 1.5 m 程度を示していた。これは 25 時から 121 時までの降雨の影響を受けていたと考えられる。2014 年、2011 年以外の洪水は直前の雨の影響は小さかったため、推定ピーク水位は大きくならなかったと考えられる。そのため、物部川において想定最大外力 (降雨) を考えるには、洪水時の降雨波形を 12 時間の想定最大規模降雨の降雨量に引き延ばすだけでは不十分であり、その直前の降雨についても検討する必要があることが分かった。

## 第8章 結論

大規模な洪水が発生する降雨分布は3パターンに分類できることが分かった。地形性降雨により、上流の降雨強度が大きくなる場合と、停滞性降雨により、流域均一に降雨が発生する場合、台風が流域の東側を通過した際に、降雨が上流から下流へ移動する場合であった。

ディープラーニングを用いた水位モデルを構築し、活用した。表層流を表現する時系列長の設定と、地下水を推定する長期の時系列の分解能を適切に設定する必要があったため、物部川において最適なパラメータの設定を行った。物部川では1時間時系列 288時間 480時間平均で1年の雨量時系列を学習したモデルが最適であることが分かった。

物部川において想定最大外力を導出するためには、12時間あたりの想定最大規模降雨の降雨量に引き延ばすだけでは不十分であり、その直前の降雨についても検討する必要がある。

## 参考文献

- [1] 気象庁 — 大雨や猛暑日など（極端現象）のこれまでの変化. [https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme\\_p.html](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html). 2019-01-10.
- [2] 大阪府河川整備審議会. 近年の降雨について. 2019-02-19.
- [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. 2019-02-19.
- [4] 国土交通省 水管理・国土保全局. 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. 2019-02-19.
- [5] 国土交通省四国地方整備局 高知県. 物部川水系河川整備計画. 2019-02-19.
- [6] 気象庁. 気象庁 過去の天気図. 2019-02-19.
- [7] 国立情報学研究所. デジタル台風. 2019-02-19.
- [8] 吉村耕平, 那須清吾. 中小河川における想定最大流量の合理的な推定手法の提案と水文モデルによる検証. 2018.
- [9] 中根英昭. 環境分野の深層学習研究を通じた人材育成. 2018.
- [10] 中根英昭, 若槻祐貴. 環境分野への深層学習応用研究の立ち上げについて. 2018.

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導をしてくださった主指導教員の那須清吾教授、副指導教員の高木方隆教授、副査の中根英昭教授に大変感謝いたします。中根英昭教授、中根研究室の皆さんには、研究及びディープラーニングについての助言をたくさんいただきました。また本研究の水文データを提供してくださった、国土交通省高知河川国道事務所、高知県中央東土木事務所の皆様には、この場を借りて感謝いたします。本当にありがとうございました。