共同研究報告書

整理番号第 390 号

人工知能技術を活用した
洪水予測手法の開発
共同研究報告書

平成21年3月

独立行政法人土木研究所

JFE エンジニアリング株式会社

Copyright © (2009) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

共同研究報告書
第390号　2009年3月

人工知能技術を活用した
洪水予測手法の開発

独立行政法人　土木研究所　水災害研究グループ
上席研究員（水文）　深見　和彦
研究員　（水文）　今村　仁紀

ＪＦＥエンジニアリング株式会社
産業機械エンジニアリング統括本部
部長 奥野　義博
課長 山根　総一郎
渡辺　直樹
鋼構造事業部
顧問 瀬戸口　忠臣
ＪＦＥ技研　エネルギー環境システム研究部
主任研究員 山口　以昌
主任研究員 園田　克樹
主任研究員 古本　直行

要　旨

近年，全国各地で多発する局地的な集中豪雨による河川氾濫災害が頻発しており，洪水予警報の基盤となる洪水予測システムについて，迅速かつ効率的に構築できる手法の確立が必要となってきている．

本研究では人工知能を活用することで高速にモデルを構築することを試みた。洪水予測システム構築の人的・時間的コストを大幅に削減できると期待される．検証事例として，利根川水系渡良瀬川上流に位置する草木ダム流入量予測と，山口県佐波川、福岡県遠賀川、御笠川、神奈川県鶴見川、酒匂川の水位予測の研究成果を報告する．

キーワード：河川水位予測、ダム流入量予測、感潮域、人工知能技術、遺伝的プログラミング、GMDH

まえがき

近年、局所的な集中豪雨の影響を受けやすい中小河川における水害が相次いでいる。これらの水害を軽減するための現実的な対策として、洪水予測情報を基盤とした水防・避難警戒体制を確立することが喫緊の課題となっている。国直轄管理の大河川において現在多く用いられている、従来の貯留関数法やタンクモデル法といった洪水予測モデルは、長年の豊富な適用実績があるが、適切なモデルパラメータを同定・構築するためには、十分な経験を有する技術者による試行錯誤を含む高度なパラメータ解析を行う必要があり、高コスト化の一つの原因となっている。したがって、これらの従来技術は、重要河川における重点的な洪水予測システム整備には適しているが、コストと労力の面から、全国に数多くある中小河川に対する網羅的なシステム整備に対する適用には限界がある。

そこで、土木研究所では、様々なリアルタイム水文観測値（テレメータ雨量だけでなく、レーダ雨量を入力として検討する）とある地点における洪水流出量（もしくは水位）との関係について、ブラックボックスの入出力系とし、その関係をニューラルネットワーク等の人工知能技術を活用することで簡便かつ自動的に探索・決定することで、少ないコストと労力で洪水予測モデルを構築できる手法の開発に取り組むこととした。その際、入出力系のモデル構築・パラメータ解析を自動で高速に実施する人工知能技術に精通した組織や機関から、上記の研究課題に対して提案を受け、土木研究所が有する洪水予測分野でのレーダ雨量計利活用技術、流出解析モデル構築技術や精度管理等における専門的知識・経験と組み合わせることで、所定の成果を効率的に達成するための共同研究を行うこととした。本報告書は、JFE エンジニアリング株式会社からの提案を受けて土木研究所との間で実施した共同研究（平成１８～１９年度）の成果をとりまとめたものである。

本研究では、人工知能技術を応用した遺伝的プログラミングによる洪水予測モデル構築手法について、まず、人工的要因の少ない山地上流域のダム流入量の予測を対象として、技術応用の妥当性に関する基本的な検証を行った。さらに、河川・流域特性がそれぞれ異なる幾つかの中小規模の河川に対して、本手法により水位予測モデルを構築して検証し、さまざまな感度分析を通して、もっとも合理的と考えられる適用手法について検討を加えた。

本研究の成果により、人工知能技術の一つである遺伝的プログラミングを活用した洪水予測モデルの特徴および合理的な適用手法と期待できる精度について、相当程度明らかにすることができたと考える。もちろん、本研究において適用・検証を行うことができた河川は、全国に数多ある中小河川のごく一部にすぎず、ここで提案した手法の最終的な評価は、今後の全国各地での幅広い実践を通して明らかにしていくべきものと考える。

本報告書に対するご意見を土木研究所 ICHARM 水文チームまでお寄せいただければ幸いである。

平成２１年３月

土木研究所　水災害・リスクマネジメント国際センター(ICHARM)
水災害研究グループ　水文チーム

≪ 目 次 ≫

1. 研究目的 5

2. 研究方法 6

2.1. 時系列データの解析（ADE） 6
2.2. 水位/流量予測モデルの構築（PAC） 7

3. 対象河川流域別に見た洪水予測モデルの検証結果 10

3.1. 草木ダム流入量予測解析 10

3.1.1. 流入量予測モデルの構築 12
3.1.2. 学習トレース結果 14
3.1.3. 未知データの予測結果 15
3.1.4. ピーク精度評価 16
3.1.5. まとめ 19

3.2. 佐波川水位予測解析 20

3.2.1. 水位予測モデルの構築 22
3.2.2. 学習トレース結果 24
3.2.3. 未知データの予測結果 27
3.2.4. 水位レベル別精度評価 29
3.2.5. 出水ピーク・立上り・立下り精度評価 31
3.2.6. 学習データの範囲と未知データの範囲 40
3.2.7. まとめ 42

3.3. 遠賀川水位予測解析 43

3.3.1. 遠賀川水位予測モデルの構築 45
3.3.2. 学習トレース結果 49
3.3.3. 未知データの予測結果 59
3.3.4. 水位レベル別精度評価 69
3.3.5. 出水ピーク・立上り・立下り精度評価 76
3.3.6. 学習データの範囲と未知データの範囲 99
3.3.7. まとめ 102

3.4. 酒匂川水位予測解析 103
3.4.1. 水位予測モデルの構築 105
3.4.2. 学習トレース結果 107
3.4.3. 未知データの予測結果 110
3.4.4. 水位レベル別精度評価 113
3.4.5. 出水ピーク・立上り・立下り精度評価 116
3.4.6. 学習データの範囲と未知データの範囲 125
3.4.7. まとめ 127
3.5. 鶴見川水位予測解析 128
3.5.1. 水位予測モデルの構築 130
3.5.2. 学習トレース結果 133
3.5.3. 未知データの予測結果 137
3.5.4. 水位レベル別精度評価 139
3.5.5. 出水ピーク・立上り・立下り精度評価 142
3.5.6. 学習データの範囲と未知データの範囲 151
3.5.7. 流域付帯設備の影響 153
3.5.8. まとめ 153
3.6. 御笠川水位予測解析 154
3.6.1. 水位予測モデルの構築 156
3.6.2. 学習トレース結果 158
3.6.3. 未知データの予測結果 159
3.6.4. ピーク精度評価 160
3.6.5. まとめ 161
4. モデル特性に関する検証結果 162
4.1. 洪水到達時間と相互情報量の関係 162
4.1.1. 洪水到達時間の算出方法 162
4.1.2. 雨量と水位の相互情報量解析 163
4.1.3. 洪水到達時間と相互情報量解析の比較分析 166
4.1.4. まとめ 171
4.2. 水位過去参照時間の検証 172
4.2.1. 草木ダム及び佐波川の水位過去参照時間の比較 172
4.2.2. まとめ 175
4.3. 平均雨量とメッシュ雨量を組み合わせたモデル検証 176
4.3.1. 分割平均雨量モデルの比較 176

4.3.2. まとめ 196
4.4. 超過洪水時の予測精度評価 198
4.4.1. 超過洪水時の予測結果 198
4.4.2. まとめ 219
4.5. 予報雨量誤差が予測水位に及ぼす影響評価 220
4.5.1. 予報雨量誤差による評価方法 220
4.5.2. 予報雨量誤差付加時の予測結果 221
4.5.3. 予報雨量誤差付加時の影響評価 230
4.5.4. まとめ 232
5. 結論 233
5.1. 研究結果 233
5.1.1. 対象河川流域別に見た洪水予測モデルの検証結果 233
5.1.2. モデル特性に関する検証結果 236
5.2. 研究成果 239
6. 今後の問題点等 241
参考文献 242
巻末資料（その１） 243
巻末資料（その２） 266

1. 研究目的

本共同研究では、様々なリアルタイム水文観測値（テレメータ雨量およびレーダ雨量）とある地点における洪水流出量（もしくは水位）との因果関係をブラックボックスの入出力系とし、そのブラックボックス内の関係式を人工知能技術の一つである遺伝的プログラミングを活用することで簡便かつ自動的に探索・決定する手法を提案する。本提案手法は、人的な試行錯誤を低減するものと期待されるが、流出解析分野への適用例は無く、その解析精度、適用範囲等は未知である。したがって本手法を実用化する上で必要となる適用性を検証することを目的とした。

2. 研究方法

本報では物理的なモデルを想定することなく，降水量とダム流入量あるいは水位の実績データを学習することにより自動的にその因果関係を記述するモデルを同定し、その精度検証を総合的に実施した。3.1～3.6章では対象河川流域のダム流入量および水位予測モデルを構築し予測精度の検証を行い、4.1、4.2章ではモデルの入力要素となる降雨量や水位の入力方法の検討を行った。4.3章ではメッシュ雨量と平均雨量の特性を考慮した雨量データの入力方法を検討した。4.4章では未経験の大出水における予測精度を検証した。4.5章では予報雨量の誤差が予測水位に及ぼす影響を評価した。

解析にはJFEエンジニアリング株式会社製のソフトウェアプログラムWinmuSe®[1)]を使用した。WinmuSe®は人工知能技術を応用したソフトウェアで、時系列データの特性を解析するADE（Advanced Data Evaluater）、時系列データを学習することによりその因果関係を記述するモデルを自動生成するPAC（Program Auto Creation）、シミュレータの入力変数を最適化するRET（Reverse Engineering Technology）の各機能から構成されている。また、高速演算を実現するため並列計算システムを採用している。

本解析では、まずデータ解析エンジンADEを用いて降雨量等の影響因子と水位（あるいは流量）の相関関係等を解析し、その結果を元にプログラム自動生成エンジンPACを用いて実績データ（水位や降雨量等）を学習し、水位/流量予測モデルを生成した。各エンジンの概要を以下で説明する。

2.1. 時系列データの解析（ADE）

時系列データの特性を解析する機能として、相関解析、相互情報量解析、ノイズ解析、主成分分析、独立成分分析、高速フーリエ解析等の解析エンジンを搭載している。本報では、水位と雨量データの特性を分析するため、相互情報量解析を適用している。図2-1に示すように、相互情報量はある時刻のある条件値（例えば降雨量）を知ることにより現在のターゲット値（例えば水位）について得られる情報量の期待値を表している。

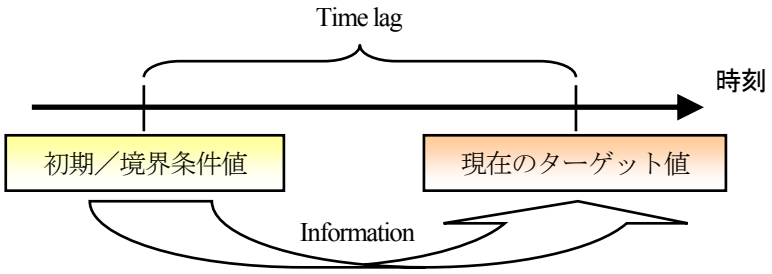


図2-1　相互情報量解析のイメージ

事象 Ai（i＝1,･･･,M）が生じたことを知って獲得する情報の大きさを情報量 I(Ai)と定義して式 2-1 と表す。ただし事象 Ai が生起する確率を P(Ai)とし各事象の生起確率は互いに独立とする。M 個の事象 Ai について獲得できる平均情報量 I(A)は式 2-2 で表せる。つまり M 個の事象が生じた後に獲得できる情報量の期待値が I(A)である。

$$I(A_i) = \log \frac{1}{P(A_i)} = -\log P(A_i) \qquad \text{式 2-1}$$

$$I(A) = -\sum_{i=1}^{M} P(A_i) \log P(A_i) \qquad \text{式 2-2}$$

事象 X,Y に関する平均情報量 I(X),I(Y)を用いて、相互情報量 I(X,Y)を式 2-3 のように定義する。相互情報量 I(X,Y)とは Y（あるいは X）を知ったことで X（あるいは Y）について得られる平均情報量である。例えば、ある時刻のある一つの初期（あるいは境界）条件値を X、現在のターゲット値を Y とすると、I(X,Y)は条件値 X を知ったことでターゲット値 Y について得られる平均情報量ということになる。なお、式 2-3 における確率密度はヒストグラムでモデル化し、階級数に関してはスタージェンス公式（式 2-4）により決定した。相互情報量 I(X,Y)は事象 X,Y が独立事象ならば 0 となるが、事象 X,Y に相関があれば正となる。

$$I(X,Y) = I(X) - I(X \mid Y) = I(Y) - I(Y \mid X)$$
$$= \int_X \int_Y p(x,y) \log \frac{p(x,y)}{p(x)p(y)} dxdy \qquad \text{式 2-3}$$

$$I(X) = -\int_X p(x) \log p(x) dx = \int_X \int_Y p(x,y) \log \frac{1}{p(x)} dxdy$$

$$I(X \mid Y) = -\int_Y p(y) I(X \mid y) dy = -\int_X \int_Y p(x,y) \log \frac{p(x,y)}{p(y)} dxdy$$

ただし、p(x,y)：事象 x,y が同時に生起する確率密度、p(x)：事象 x が生起する確率密度、p(y)：事象 y が生起する確率密度である。

$$M = 1 + \frac{\log N}{\log 2} \qquad \text{式 2-4}$$

ただし、M：確率密度モデルとなるヒストグラム、N：ヒストグラムを形成するデータ点数である。

2.2. 水位/流量予測モデルの構築（PAC）

一般的なモデル同定手法としては，ニューラルネットワークや GMDH を用いた学習手法 [2)-5)]が知られているが，ネットワーク構造の設計に人的試行錯誤が必要であることに加え，パラメータの決定に非線形最適化手法を用いているため、計算の収束に時間がかかり，仮に収束した場合も局所解であることが多いといった問題点がある。本報では、このような人的試行錯誤を排除し、短時間でモデルを構築するための手法として、

問題を解決する手法として、GMDH（Group Method of Data Handling）の演算構造を遺伝的プログラミング（Genetic Programming: GP）と呼ばれる生物進化を模擬した手法で最適化する方法[6]を採用している。

GMDH は, 重回帰ユニットを多層に構造化することで複雑な非線形システムを同定する手法である。図 2-2 に GMDH の重回帰ユニット構造を示す．ここで，x は初期に与えられた入力要素で，z は重回帰ユニットの出力である．１層目は入力要素 x のみでユニットが構成され，２層目以降は下層ユニットの出力 z あるいは入力要素 x によりユニットが構成されている．

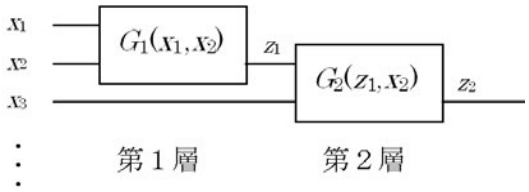


図 2-2　GHDH の重回帰ユニット構造図

重回帰ユニットの構成式は式 2-5 に示すような二次式で表され, 各項の係数 a_1～a_6 は各ユニットの入力データと教師データから最小二乗法により決定する．

$$G(x,y)=a_1+a_2x+a_3x^2+a_4xy+a_5y+a_6y^2 \qquad \text{式 2-5}$$

この重回帰ユニットの構造を最適化する手法として、遺伝的プログラミングを適用した。遺伝的プログラミングは重回帰ユニットの一つ一つを遺伝子として表現し、ネットワーク構造を遺伝子の集合体である個体として表現することを基礎とする最適化手法である[1]．図 2-3 に遺伝的プログラミングの計算フローを示す．ランダムに生成された初期の個体に対して交叉，突然変異等の遺伝操作を繰り返し行うことで優秀な個体すなわち最適な GMDH のネットワーク構造を探索することができる．また，図 2-4 に遺伝操作の一つである交叉の例を示す．これは優秀な個体間で遺伝子ノードの一部分を相互に交換することで，より優秀な個体を生成することを狙ったものである．

学習により生成されたモデルのソースコードを図 2-5 に示す。生成されたソースコードは Windows や Linux の環境でコンパイルすることが可能であり、実行モジュールにシミュレーション用のデータ（初期条件/境界条件）をインプットすることにより将来の予測値を計算することができる。

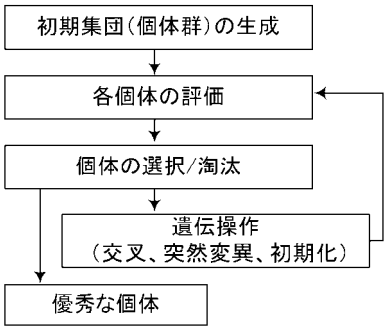


図 2-3　遺伝的プログラミングの計算フロー

[1] 以下、この一連のプロセスにより、データから重回帰ユニットを同定することを「学習」と呼ぶ。

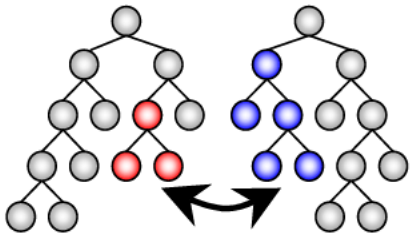


図 2-4　遺伝操作の一例（交叉）

```
subroutine simulatorv(xx,nx,yy,ny,tt,ierror)
    implicit double precision (a-h,o-z), integer (i-n)
    double precision :: xx(nx), yy(ny) ! nx=   24,ny=    1
    double precision :: xx1(   12), xx2(   12)
    double precision :: vector(   12), data_principal(   12), wght(   12)
    double precision :: x(   12,   1)
    double precision :: t(  155,   1)
    double precision :: a1(  1),b1(  1)
    double precision :: d0(  1), d1(  1), d2(  1), d3(  1), d4(  1)
    double precision :: p(    409)
    common / param / p

                                    (略)

    t(  155,1:  1)=0.d0
    a1(1:  1)=t(   75,1:  1)
    d1(  1:  1)= p(    406+ik:    406+ik)
    call twobion_multiplication(a1,d1,d0,  1)
    b1(1:  1)=t(  154,1:  1)
    d1(  1:  1)= p(    407+ik:    407+ik)
    call twobion_multiplication(b1,d1,d3,  1)
    d0=d0+d3
    t(  155,:) = d0
    do ij=1,    1
        if(dabs(t(  155,ij)).lt.   0.2220446049250313D-15) then
            t(  155,ij)=0.d0
        else if(dabs(t(  155,ij)).gt.   0.4503599627370496D+15) then
            ierror=1 ; return
        endif
    enddo
    t(  155,:)=dsin(t(  155,:))

    if( t(  155,  1).gt.   0.1177527950463094D+02) then
        t(  155,  1)=   0.1177527950463094D+02
    elseif( t(  155,  1).lt.  -0.1179671908919009D+02) then
        t(  155,  1)=  -0.1179671908919009D+02
```

図 2-5　生成されたプログラム例

3. 対象河川流域別に見た洪水予測モデルの検証結果

3.1. 草木ダム流入量予測解析

草木ダムの流入量予測解析を実施した．解析に用いたデータの概要を以下に示す．

（1）水系

水系：利根川水系渡良瀬川

流域面積：254km^2

管理：独立行政法人水資源機構草木ダム管理所

（2）データ期間

1983～2005 年に観測されたピーク流入量 200m^3/s 以上の出水 36 ケース

（3）実績流量

草木ダム流入量データ

（4）実績雨量

地上雨量データ（流域平均に換算済）

（５）流域配置図

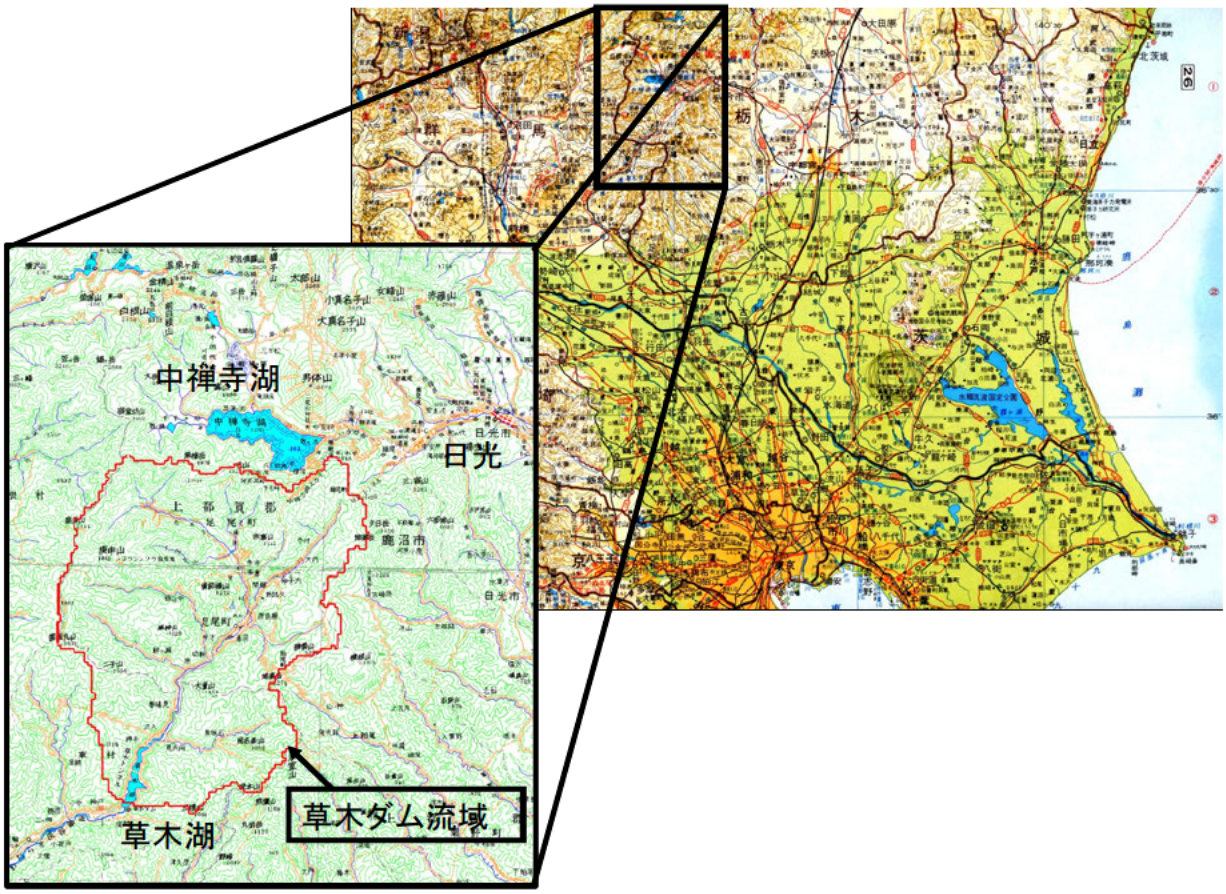


図 3-1　草木ダム流域図

3.1.1. 流入量予測モデルの構築

本解析では草木ダムの流入量について解析を行った．流入量予測モデルの作成に用いたデータは、草木ダム流入量と地上雨量（流域平均雨量に換算）の 1 時間毎データとした．学習対象は 1983 年～1998 年の出水 20 ケース、未知データの予測対象は 1999 年～2005 年の 16 ケースとした．

流入量予測モデルを式 3-1 のように定義し，学習によりモデル関数 f を同定した．なお，雨量の過去参照時間は流量と雨量の相互相関が最大となる時間差とした．

$$Q(t+1) = f(Q(t), R(t+1), \ldots, R(t-8)) \qquad \text{式 3-1}$$

ただし，Q：流入量，R：流域平均雨量，t：時間である．

解析では 6 時間先までの実績雨量を用い 6 時間先までのダム流入量を予測した．表 3-1 に時刻 t の実績流入量 $Q(t)$を初期値とし，1 時間先の $Q(t+1)$の流入量を予測する場合の入出力データを示す．$Q(t+6)$を計算するためには，これを 6 ステップ繰り返す．ただし，$Q(t+2)$から $Q(t+5)$は各ステップの計算値が入る．

表 3-1　水位予測計算の入出力データ

時刻	流入量	地上雨量
t-8		$R(t-8)$
t-7		$R(t-7)$
t-6		$R(t-6)$
t-5		$R(t-5)$
t-4		$R(t-4)$
t-3		$R(t-3)$
t-2		$R(t-2)$
t-1		$R(t-1)$
t	$Q(t)$	$R(t)$
t+1	$Q(t+1)$	$R(t+1)$

表 3-2 に解析に用いた出水イベントを示す．各ケース No.はピーク流量の高い順に表示した．

表 3-2　草木ダムの出水イベント

	No.	出水日時	ピーク流量 (m^3/s)	総雨量（流域平均） (mm)
学習	1	1998-09-16 7:00 &1998-09-21 23:00	1347.14 309.83	273.6 196.7
	2	1990-08-10 15:00	1006.67	328.2
	3	1985-07-01 5:00	973.38	200.92
	4	1991-08-20 23:00	829.49	307.2
	5	1990-09-20 4:00	767.16	212.4
	6	1983-08-17 12:00	707.04	386.24
	7	1997-06-20 16:00	649.96	166
	8	1994-09-30 6:00	611.18	296.6
	9	1989-08-27 17:00	537.9	238.1
	10	1991-08-31 10:00	521.61	176.9
	11	1991-09-19 14:00	505.3	295.3
	12	1990-11-30 22:00	452.89	162.3
	13	1986-09-03 8:00	419.03	235.66
	14	1998-08-30 14:00	371.15	434.7
	15	1985-08-05 2:00	321.86	149.24
	16	1993-11-14 2:00	308.74	138.6
	17	1994-05-27 7:00	256.82	177.6
	18	1998-10-18 9:00	252.5	154.1
	19	1994-09-17 19:00	251.13	287.4
	20	1983-09-29 0:00	205.27	117.38
未知	1	2001-08-22 11:00	1210.13	348.2
	2	2001-09-10 22:00	1119.19	554.5
	3	2002-07-11 3:00	921.57	413.7
	4	2003-08-09 16:00	627.79	261
	5	2002-10-01 21:00	564.96	149.1
	6	1999-08-14 22:00	419.11	296.1
	7	1999-07-12 17:00 &1999-07-14 5:00	248.83 350.04	156.8 189.6
	8	2004-06-21 20:00	278	85.4
	9	1999-06-30 12:00	274.19	218.9
	10	2005-08-26 1:00	258.32	204
	11	2000-09-12 14:00	254.3	227.6
	12	2004-09-30 5:00	254.09	107.1
	13	2005-07-26 22:00	240.4	177
	14	2004-10-09 20:00	218.31	288.1
	15	2004-10-21 0:00	216.62	118.9
	16	2001-10-11 1:00	200.15	123.3

3.1.2. 学習トレース結果

学習が十分に行われたかを確認するため、学習に用いたデータを用いて流入量予測計算を実施した。図 3-2 に最大出水時の結果を示し、図 3-3 に誤差が最大となった結果を示す。

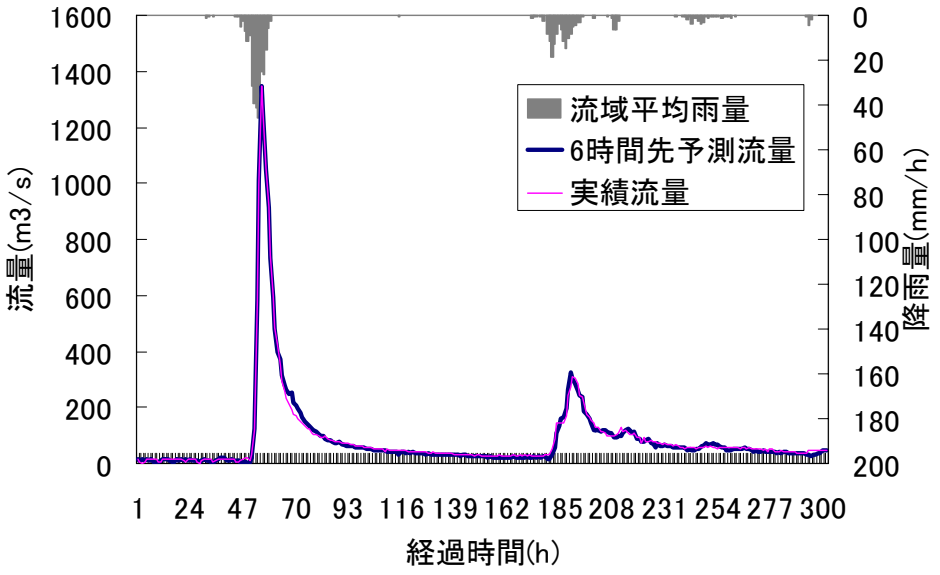


図 3-2　草木ダムにおける最大出水の計算結果（学習ケース No.1）

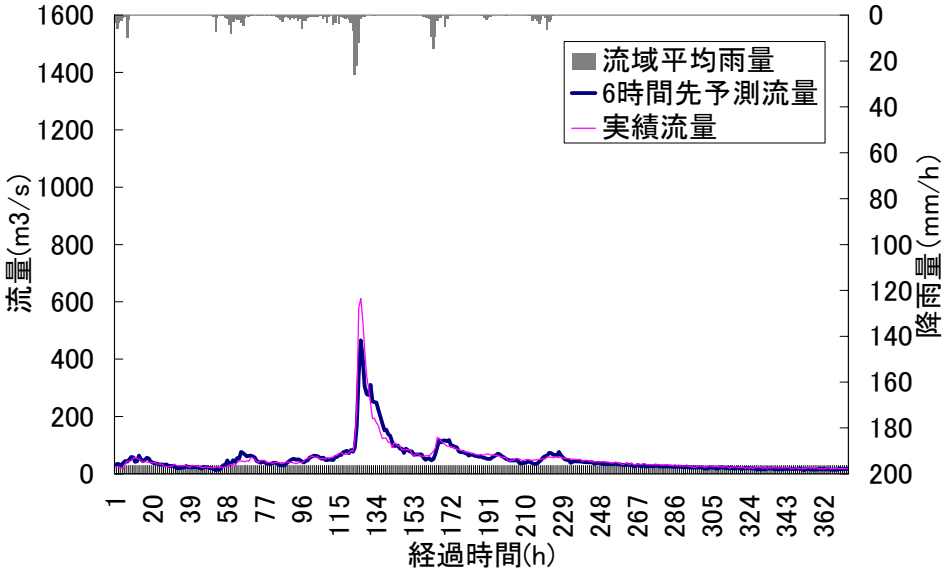


図 3-3　草木ダムにおける誤差が最大の計算結果（学習ケース No.8）

3.1.3. 未知データの予測結果

次にモデルにとっては未知となるデータを用いてモデルの予測計算を実施した。図 3-4 に最大出水時の結果を示し、図 3-5 に誤差が最大となった結果を示す。

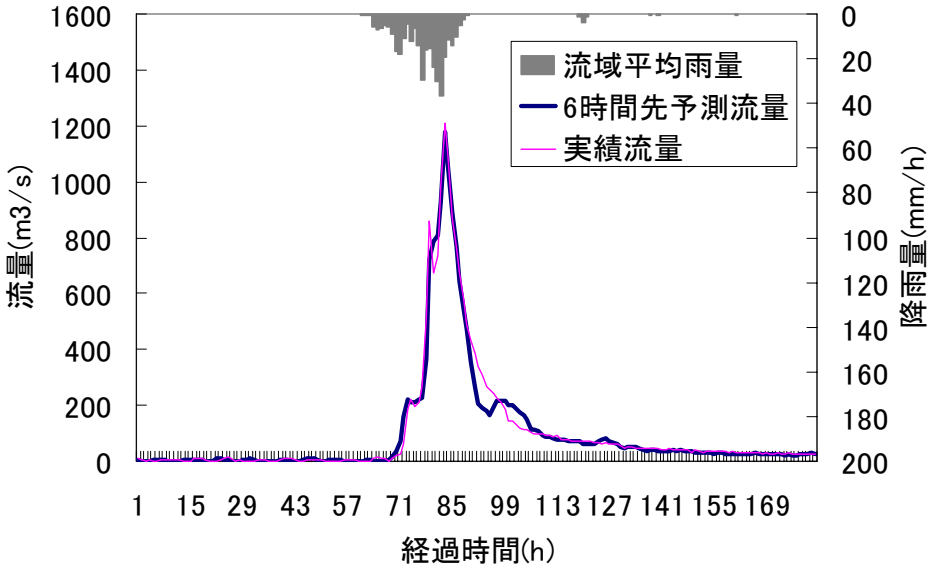


図 3-4　草木ダムにおける最大出水の計算結果（未知ケース No.1）

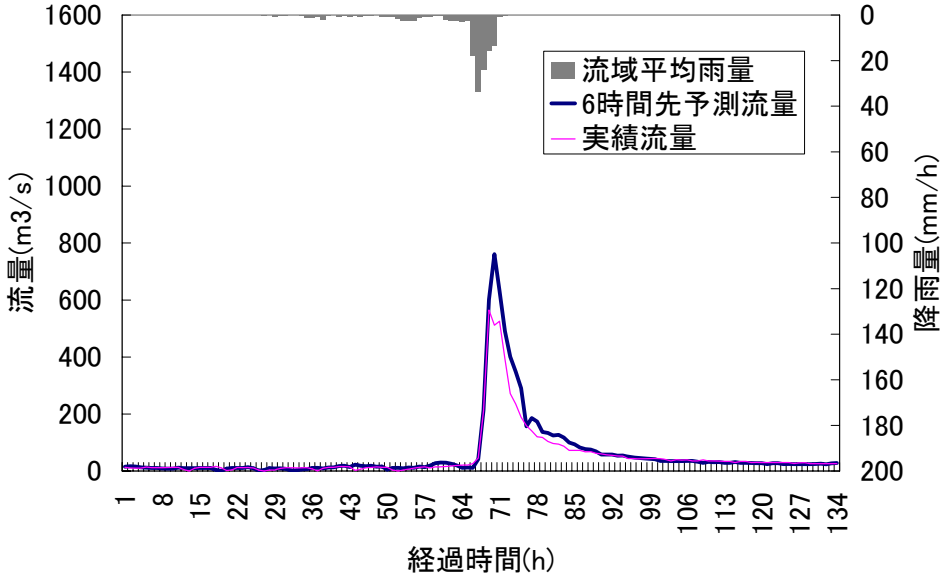


図 3-5　草木ダムにおける誤差が最大の計算結果（未知ケース No.5）

3.1.4. ピーク精度評価

学習トレース[2]の最大出水事例では、ピークの実績流量 1347.14m^3/s に対し予測流量が 1349.6m^3/s と誤差は 0.2%に止まり，図 3-4 に示した未知予測ではピークの実績流量 1210.13m^3/s に対し予測流量が 1176.5m^3/s と誤差は 2.7%に止まっている．いずれの計算結果も，良好な精度で予測できた事例である．

次に、図 3-3 に示した学習トレースの最大誤差事例では、ピークの実績流量 611.2m^3/s に対し予測流量が 465.3m^3/s と誤差は 23%となり、図 3-5 に示した未知予測ではピークの実績流量 565m^3/s に対し予測流量が 761.2m^3/s と 35%の誤差が生じている．本解析では流域平均雨量を用いているため，局地的な雨量の影響を捉えられないケースで比較的大きな誤差が発生したと考えられる．

全ケースの解析結果について，洪水ピーク流量の予測値と実績値を比較した結果を図 3-6，図 3-7、表 3-3、表 3-4 にまとめて示す．学習トレースの一部（学習ケース No.8，12），未知データの一部（未知ケース No.3，5，8，12）を除く全てのケースで 100m^3/s 以下のピーク誤差に収まった．

図 3-6，図 3-7 の結果を基にピーク誤差の RMSE（平均二乗誤差）を調査した．なお，RMSE は式 3-2 により定義される．

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_i \left(\hat{x}_i - x_i\right)^2} \qquad \text{式3-2}$$

ここで，$\hat{x}$ ：予測値，x ：実績値，i ：データ番号，n ：データ総数である．

学習トレース全体の RMSE は 69.6m^3/s，未知予測全体の RMSE は 87.6m^3/s となった．未知データの誤差が若干増加しているが，大幅な悪化ではなく，本解析モデルは十分な汎化能力を有していると考えられる．

[2] 学習に用いたデータ（学習データ）を用いて流出解析を行うことを「学習トレース」、学習には用いなかったデータを用いて解析を行うことを「未知予測」と呼ぶこととする。また未知予測に用いるデータを未知データと呼ぶ。

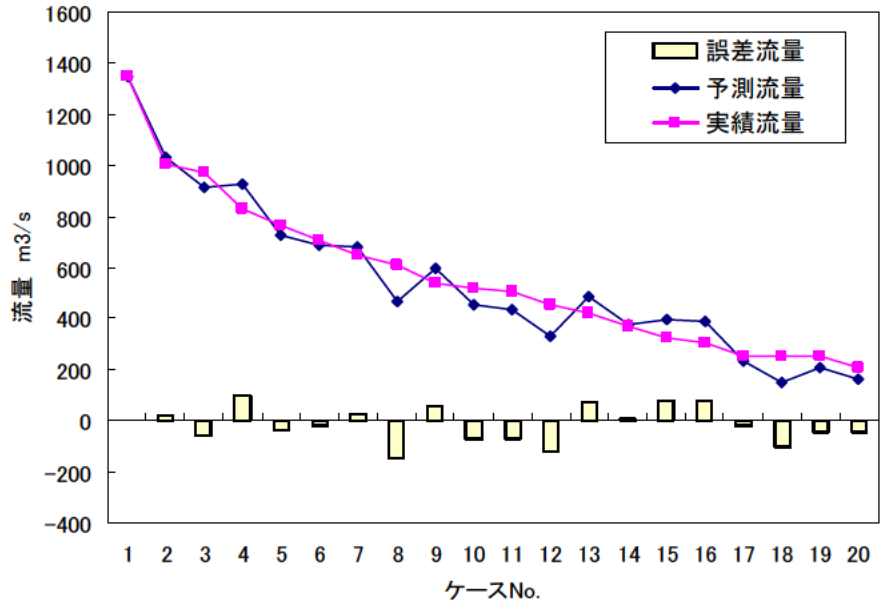


図 3-6　洪水ピーク流量の予測値と実績値の比較（学習トレース）

表 3-3　洪水ピーク流量の予測値と実績値の比較（学習トレース）

学習ケース No.	予測流量	実績流量	誤差
1	1349.642	1347.1	2.542388
2	1027.745	1006.7	21.04482
3	916.6115	973.4	-56.7885
4	925.3487	829.5	95.8487
5	727.1513	767.2	-40.0487
6	685.7554	707	-21.2446
7	680.0018	650	30.0018
8	465.2992	611.2	-145.901
9	598.8755	537.9	60.97555
10	452.6026	521.6	-68.9974
11	433.8404	505.3	-71.4596
12	330.5385	452.9	-122.362
13	488.999	419	69.99901
14	378.9284	371	7.928399
15	398.35	321.9	76.45005
16	386.8624	308.7	78.16245
17	235.5055	256.8	-21.2945
18	153.3217	252.5	-99.1783
19	205.2516	251.1	-45.8484
20	161.47	205.3	-43.83

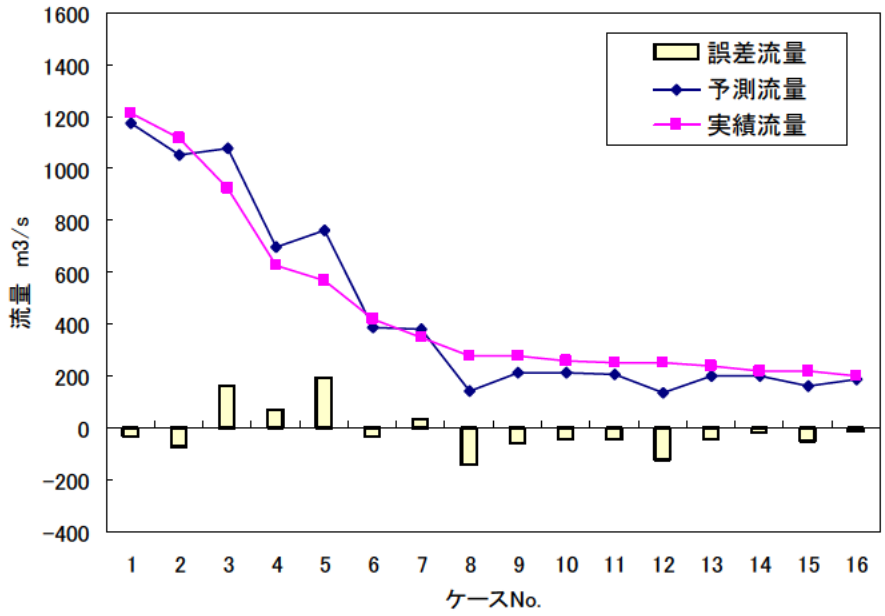


図 3-7　洪水ピーク流量の予測値と実績値の比較（未知予測）

表 3-4　洪水ピーク流量の予測値と実績値の比較（未知予測）

未知ケース No.	予測流量	実績流量	誤差
1	1176.483	1210.1	-33.6173
2	1049.4	1119.2	-69.7998
3	1080.123	921.6	158.5228
4	697.6854	627.8	69.88543
5	761.1703	565	196.1703
6	388.3605	419.1	-30.7395
7	381.7122	350	31.71221
8	138.8685	278	-139.131
9	214.6028	274.2	-59.5972
10	216.0042	258.3	-42.2958
11	208.2609	254.3	-46.0391
12	133.9693	254.1	-120.131
13	197.6379	240.4	-42.7621
14	199.5305	218.3	-18.7695
15	163.9979	216.6	-52.6021
16	187.7062	200.2	-12.4938

3.1.5. まとめ

草木ダムの事例では、20回分の出水データを用いてダム流入量予測モデルを構築し、それ以外の16回分の出水データで予測検証を実施した。200～1300m^3/sの出水ケースに対し、一部の例外を除き学習データ、未知データの全てのケースで100m^3/s以内のピーク誤差に収まった。本検証では地上雨量データから算出された流域平均雨量を用いたが、これをレーダー雨量に置き換えることにより局地的な雨量の影響も捉えることが可能となり、更に精度が向上するものと考えられる。一般にダム流域は山間地であるため降雨流出特性の変化が少なく、長期間のデータが蓄積されていることが多いため、本手法の適用性が高く、全国のダム施設において高精度な流入量予測モデルを構築できるものと期待される。

3.2. 佐波川水位予測解析

佐波川の水位予測解析を実施した。解析に用いたデータの概要を以下に示す。

（1）水系

水系：佐波川（一級河川）

延長：56km

流域面積：460km^2

ダム：佐波川（山口県）、島地川ダム（国交省）

管理：国土交通省中国地方整備局山口河川国道事務所

（2）データ期間

2004 年 1 月 1 日～2006 年 12 月 31 日の 1 時間データ

（3）実績水位

新橋、漆尾、堀の各水位観測所データ（水文水質データ確定値）

表 3-5　水位観測所諸元

	新橋	漆尾	堀
指定水位(m)	2.70	2.30	2.00
警戒水位(m)	3.40	3.40	3.00
危険水位(m)	-	-	-
計画高水位(m)	5.50	5.50	5.60
計画高水位 T.P.(m)	10.76	57.66	64.62
河口からの距離(km)	8.0	24.8	-
川幅(m)	150	160	100
豊水位（2004 年）(m)	0.35	1.36	0.75
流域面積（km^2）	423.1	338.0	203.5

（4）実績雨量

データ：気象庁 レーダーアメダス解析雨量

（5）ダム放流量

佐波川ダム、島地川ダムの観測放流量

（6）流域配置図

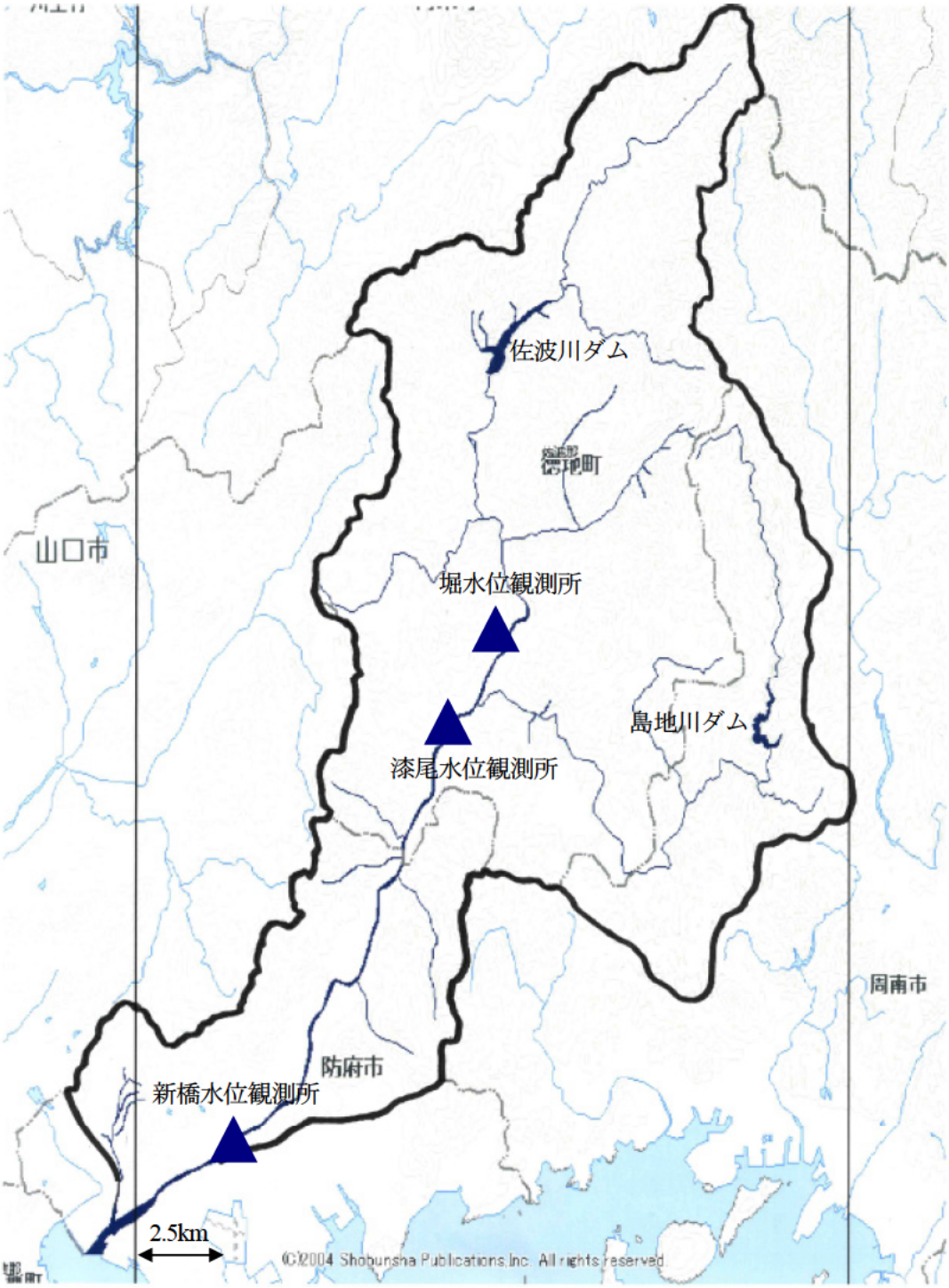


図 3-8　佐波川流域配置図

3.2.1. 水位予測モデルの構築

本解析では漆尾、新橋、堀の各水位について解析を行った。水位予測モデルの作成に用いたデータは、水位とレーダー･アメダス解析雨量とし、堀においては佐波川ダム、漆尾と新橋においては佐波川ダムと島地川ダムの放流量を追加した。学習期間は 2004 年～2005 年、未知データの予測期間は 2006 年とした。

水位予測モデルを式 3-3 に示し、表 2 に各観測所の境界条件別の過去参照時間を示す。精度比較のため、メッシュ雨量を 1 要素に単純平均してから入力する「平均雨量モデル」と、メッシュ雨量を平均化せずにメッシュ数分の要素で入力する「メッシュ雨量モデル」をそれぞれ構築した。

$$H_p(t+1)=f\left(H(t),\ldots,H(t-t_H+1),R(t+1),\ldots,R(t-t_R+2),D(t+1),\ldots,D(t-t_D+2)\right) \qquad \text{式 3-3}$$

ただし、H_p : 予測水位、H : 水位、R : 雨量、D : ダム放流量、t : 時刻 である。

表 3-6　過去参照時間

	t_H	t_R	t_D
新橋	15	9	6
堀	15	9	3
漆尾	15	9	3

解析では 6 時間先までの実績雨量/ダム放流量を用い 6 時間先までの水位を予測した。表 3-7 に時刻 t の実績水位 $H(t)$を初期値とし、1 時刻先の $H(t+1)$の水位を予測する場合の入出力データを示す。$H(t+6)$を計算するためには、これを 6 ステップ繰り返す。ただし、$H(t+2)$から $H(t+5)$は各ステップの計算値が入る。

表 3-7　水位予測計算の入出力データ

時刻	水位	ダム放流量	レーダ雨量
t-t_R+2		・・・	$R(t-t_R+2)$
・・・	・・・	・・・	・・・
t-t_D+2	・・・	$D(t-t_D+2)$	・・・
・・・	・・・	・・・	・・・
t-t_H+1	$H(t-t_H+1)$		
・・・	・・・	・・・	・・・
t	$H(t)$	$D(t)$	$R(t)$
t+1	$H_p(t+1)$	$D(t+1)$	$R(t+1)$

図 12～図 3-11 に各水位観測所のモデル構築に用いた雨量メッシュを示す。メッシュサイズは 2.5km で、太線領域は各水位予測モデルの境界条件として使用した雨量メッシュである。太線領域の北西端を起点として東方向に向かってメッシュ番号を 1 から付与し、東端まで到達したら 1 メッシュ南の西端から継続して番号を付与した。

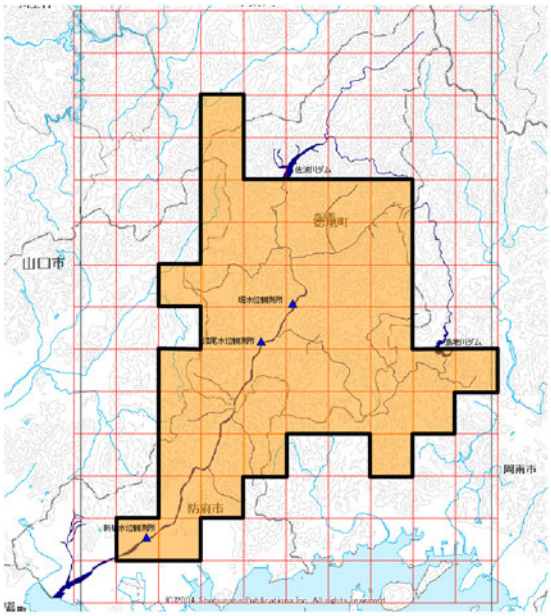


図 3-9　新橋メッシュ雨量(46 メッシュ)

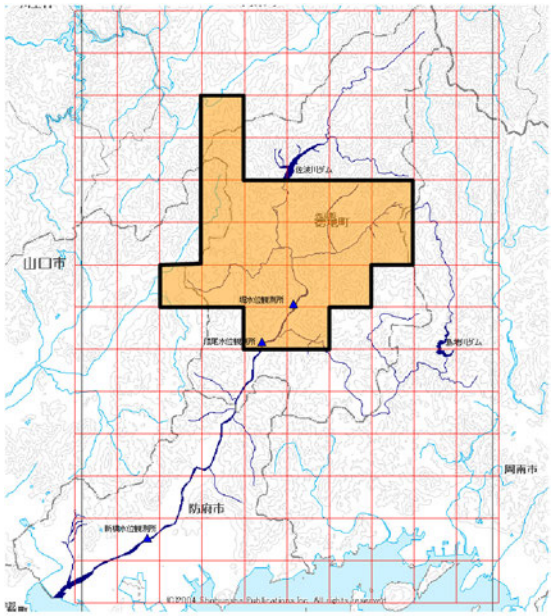


図 3-10　堀メッシュ雨量（19 メッシュ）

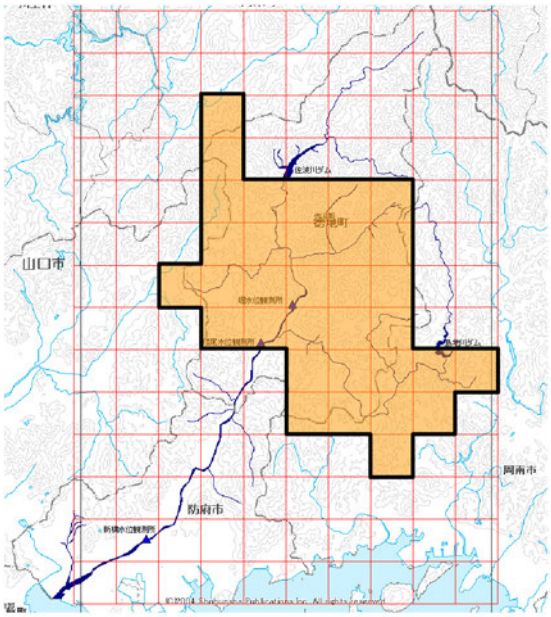


図 3-11　漆尾メッシュ雨量（33 メッシュ）

3.2.2. 学習トレース結果

学習が十分に行われたかを確認するため、学習に用いたデータを用いて水位予測計算を実施した。各観測所における平均雨量モデルの結果とメッシュ雨量モデルの結果を図 3-12～図 3-17 に示す。

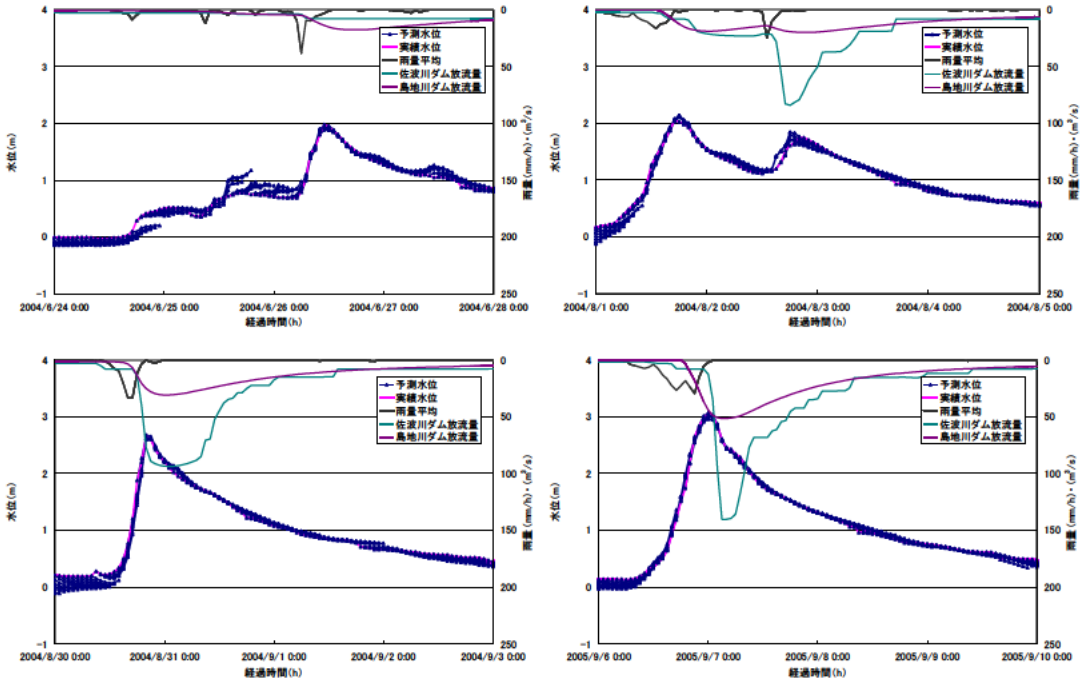


図 3-12　新橋水位　学習トレース結果（平均雨量）

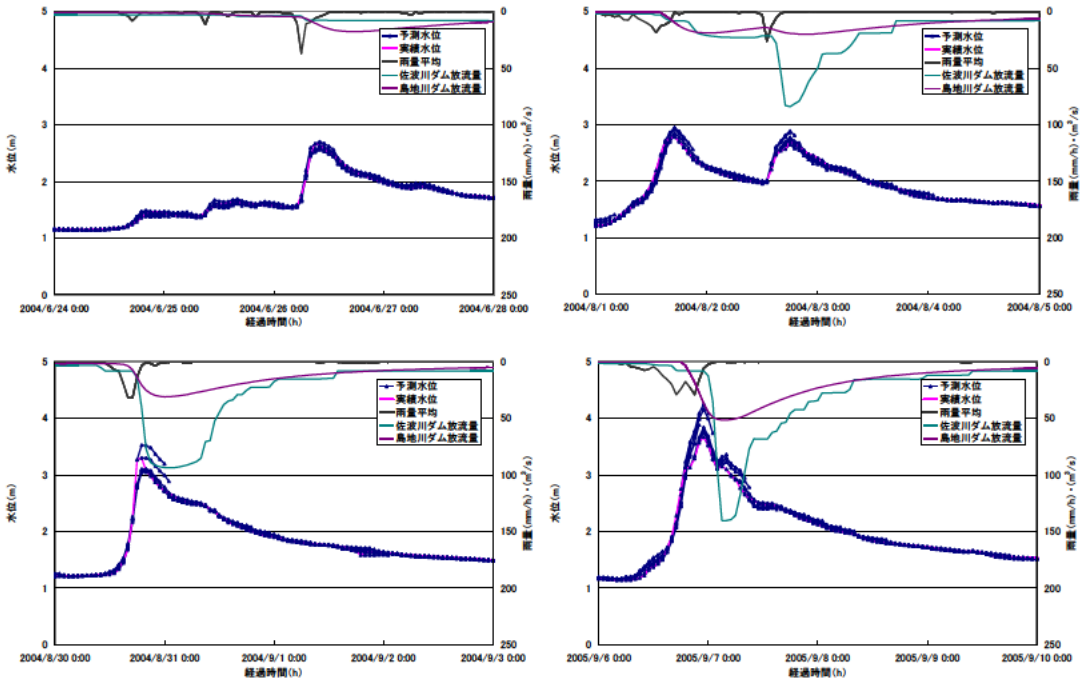


図 3-13　漆尾水位　学習トレース結果（平均雨量）

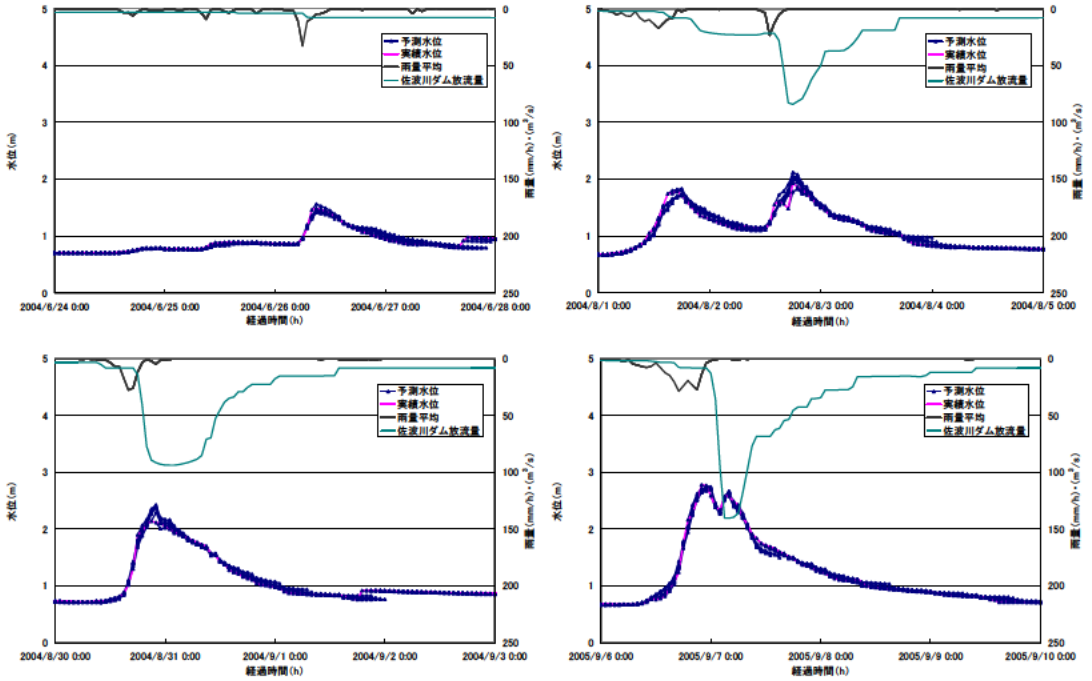


図 3-14　堀水位　学習トレース結果（平均雨量）

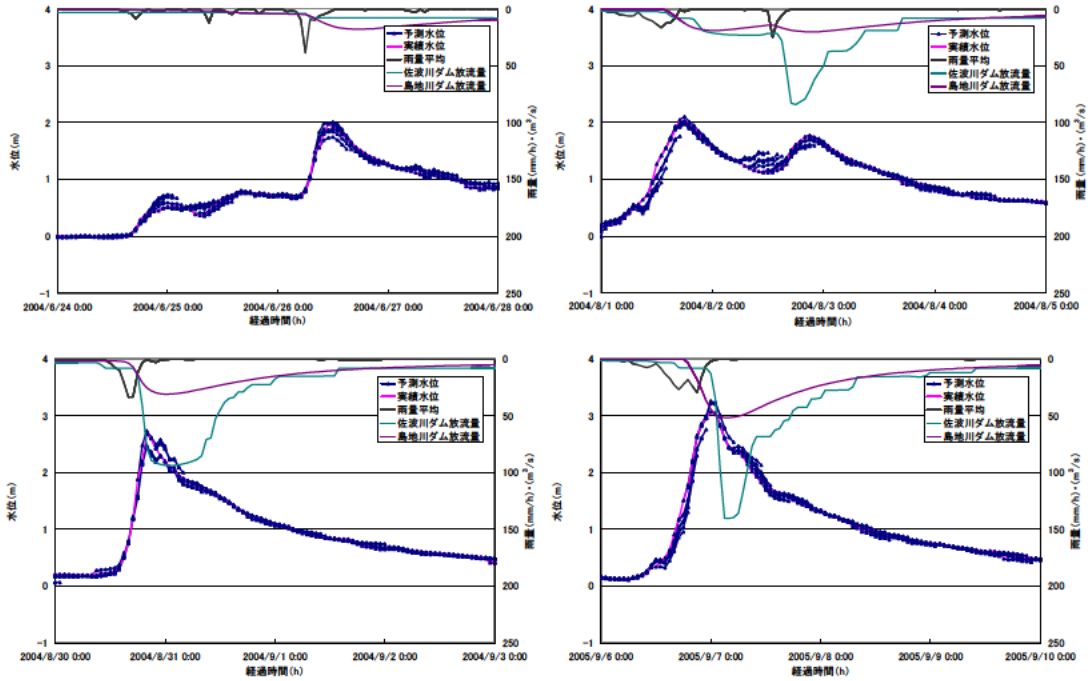


図 3-15　新橋水位　学習トレース結果（メッシュ雨量）

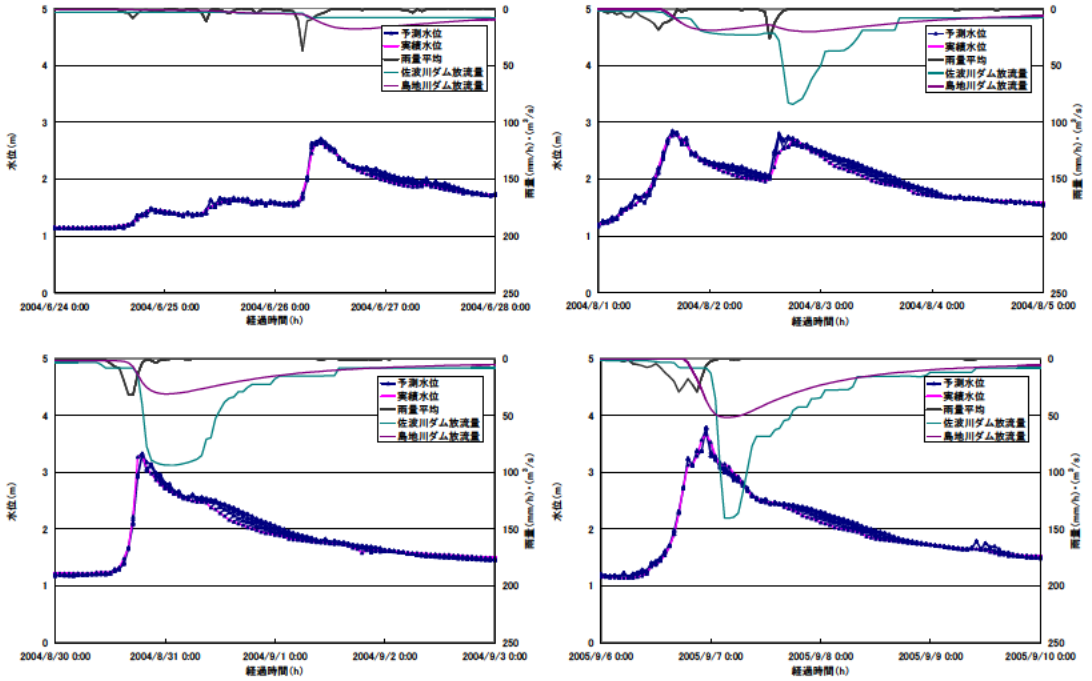


図 3-16　漆尾水位　学習トレース結果（メッシュ雨量）

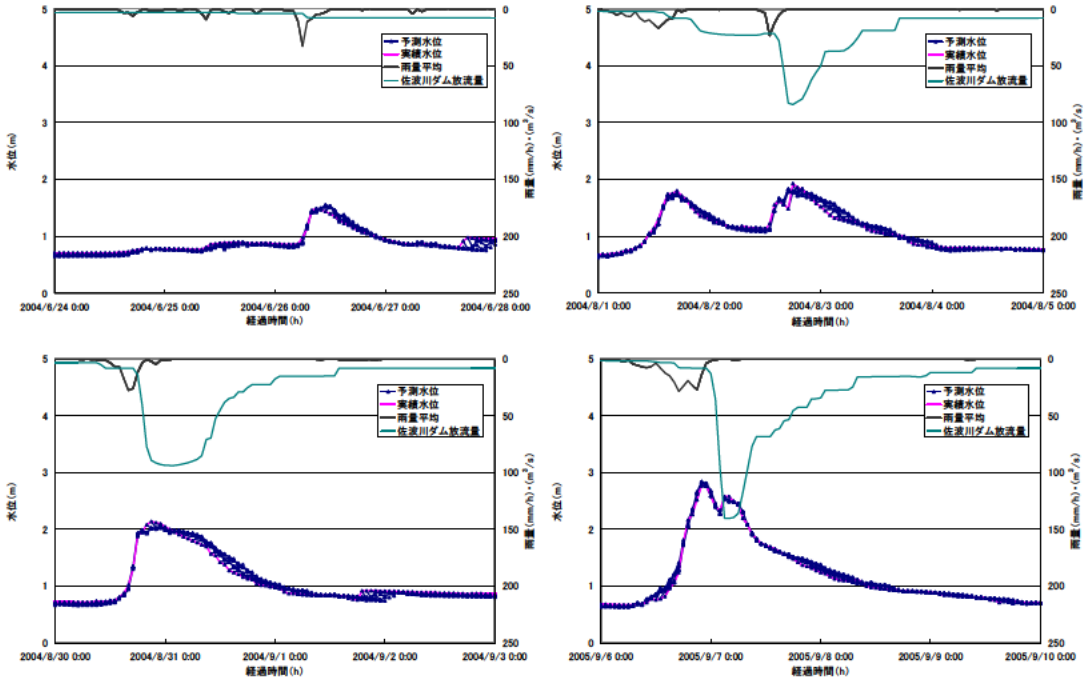


図 3-17　堀水位　学習トレース結果（メッシュ雨量）

3.2.3. 未知データの予測結果

次にモデルにとっては未知となるデータを用いてモデルの予測計算を実施した。各観測所における平均雨量モデルの結果とメッシュ雨量モデルの結果を図 3-18～図 3-23 に示す。

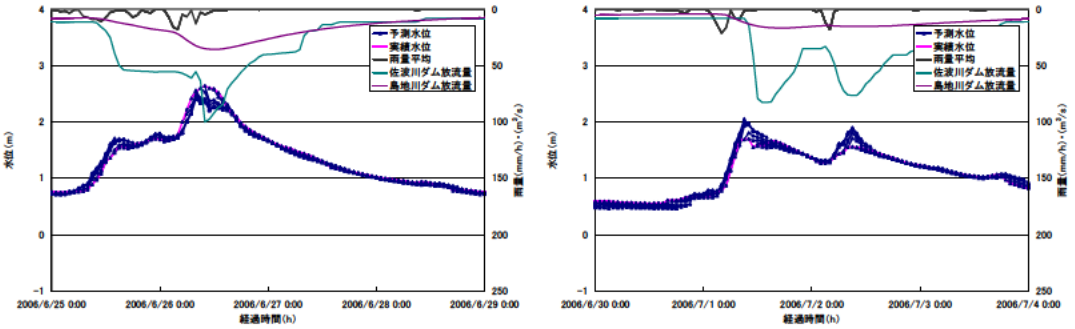


図 3-18　新橋水位 未知予測結果（平均雨量）

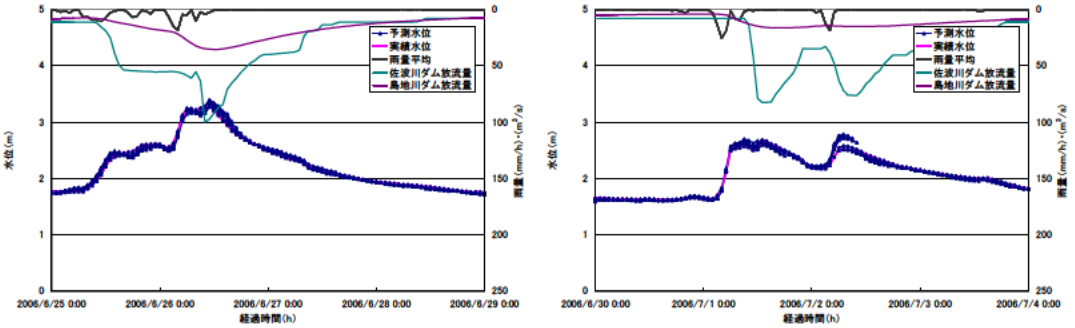


図 3-19　漆尾水位　未知予測結果（平均雨量）

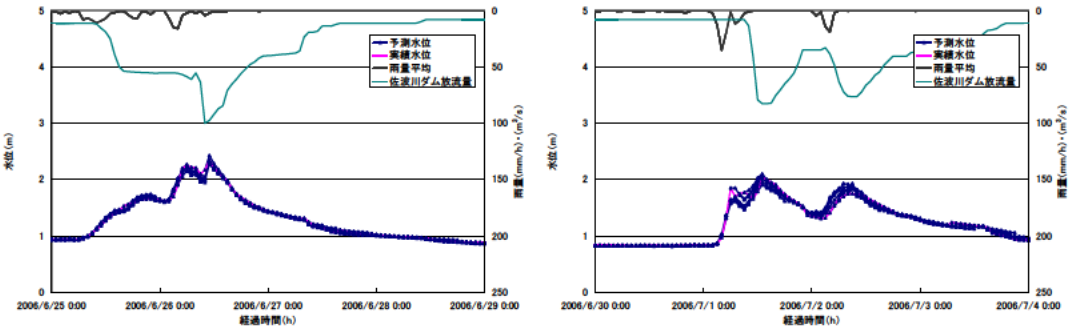


図 3-20　堀水位　未知予測結果（平均雨量）

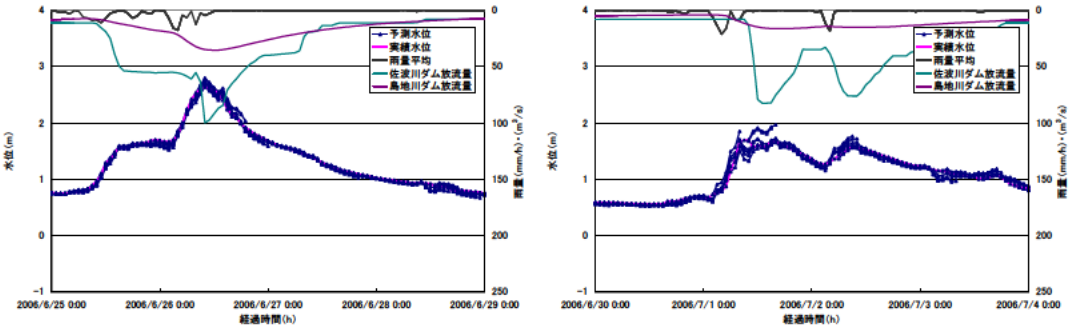


図 3-21　未知データの新橋予測水位（メッシュ雨量）

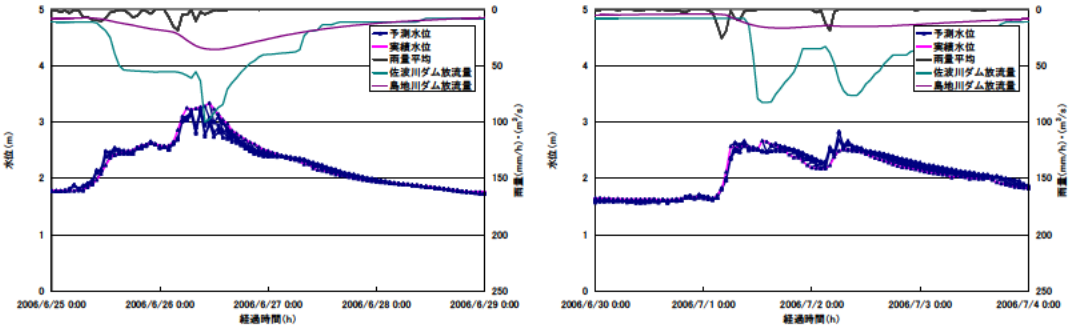


図 3-22　未知データの漆尾予測水位（メッシュ雨量）

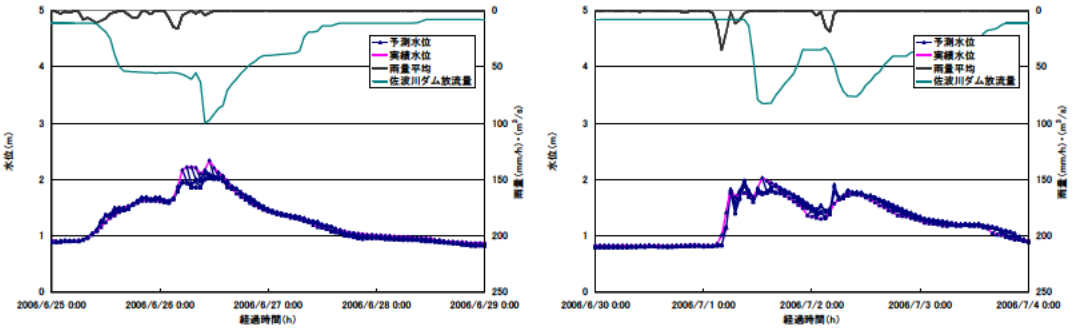


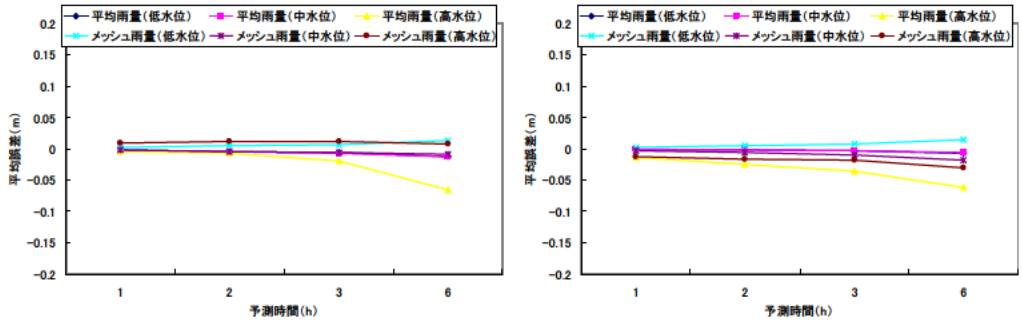
図 3-23　未知データの堀予測水位（メッシュ雨量）

3.2.4. 水位レベル別精度評価

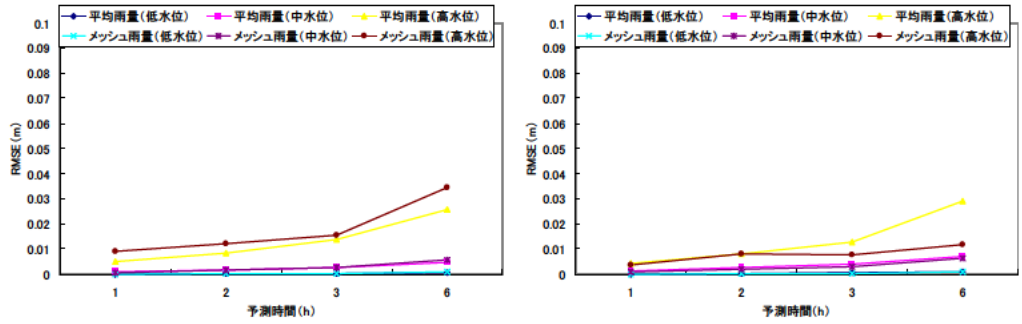
学習トレースと未知データの予測について、それぞれ平均誤差と RMSE を調べた結果を図 3-24～図 3-26 に示す。各グラフは、メッシュ雨量と平均雨量に対する、水位の高さ毎の予測先行時間と予測誤差の関係を示している。水位の高さは、低水位（レベル１）を最低水位から豊水位まで、中水位（レベル２）を豊水位から４番目に大きいピーク水位まで、高水位（レベル３）を４番目に大きいピーク水位から最大水位までの 3 段階に分類した。表 3-8 に水位観測所ごとの水位範囲を示す。

表 3-8　評価対象の水位範囲

水位観測所	水位レベル	最小値	最大値
漆尾	低水位（レベル１）	—∞	1.36
	中水位（レベル２）	1.36	1.83
	高水位（レベル３）	1.83	∞
新橋	低水位（レベル１）	—∞	0.35
	中水位（レベル２）	0.35	2.14
	高水位（レベル３）	2.14	∞
堀	低水位（レベル１）	—∞	0.75
	中水位（レベル２）	0.75	1.62
	高水位（レベル３）	1.62	∞

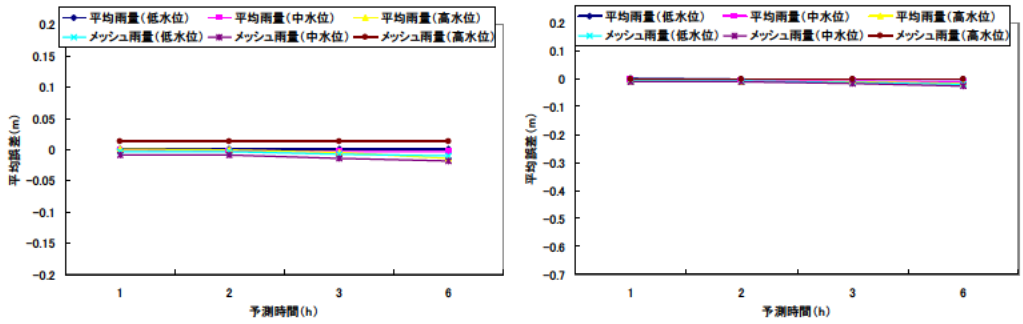


（a）学習トレースの平均誤差　　（b）未知予測の平均誤差

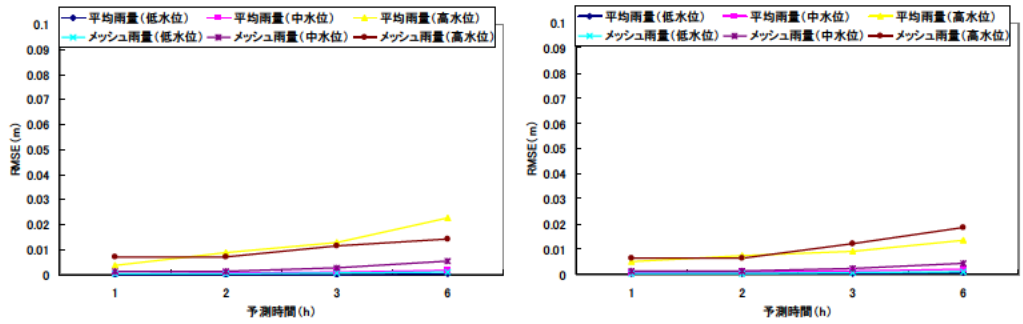


（c）学習トレースの RMSE　　（d）未知予測の RMSE

図 3-24　新橋水位　雨量別・予測時間別の精度評価

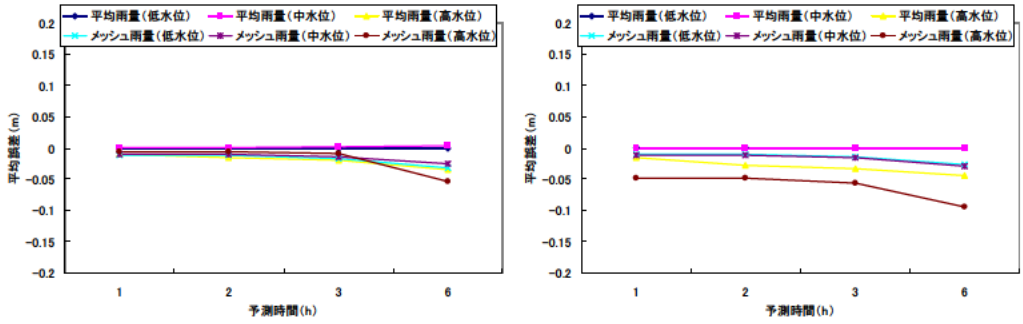


（a）学習トレースの平均誤差　　（b）未知予測の平均誤差

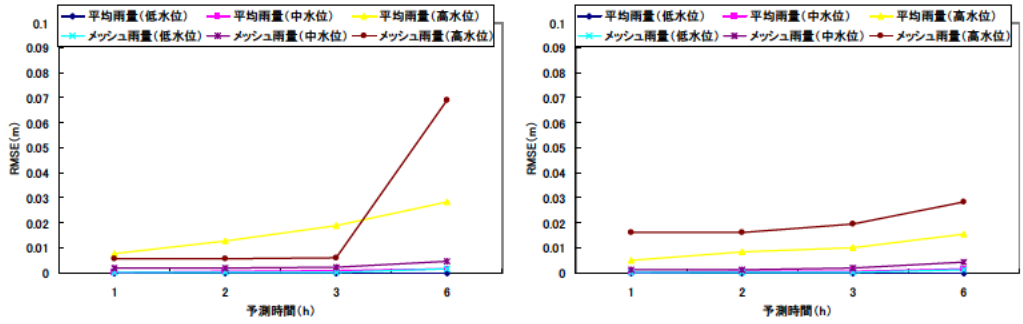


（c）学習トレースの RMSE　　（d）未知予測の RMSE

図 3-25　漆尾水位　雨量別・予測時間別の精度評価



（a）学習トレースの平均誤差　　（b）未知予測の平均誤差



（c）学習トレースの RMSE　　（d）未知予測の RMSE

図 3-26　堀水位　雨量別・予測時間別の精度評価

図 3-24～図 3-26 を基に、6 時間先予測を対象としてメッシュ雨量よりも平均雨量を用いたほうが RMSE が小さくなるケースを表 3-9 にまとめた。学習トレース、未知予測の両ケースにおいて、平均雨量モデルの方が RMSE が小さくなる割合が高いことが分かる。

表 3-9　メッシュ雨量に対して平均雨量の RMSE が小さくなるケース

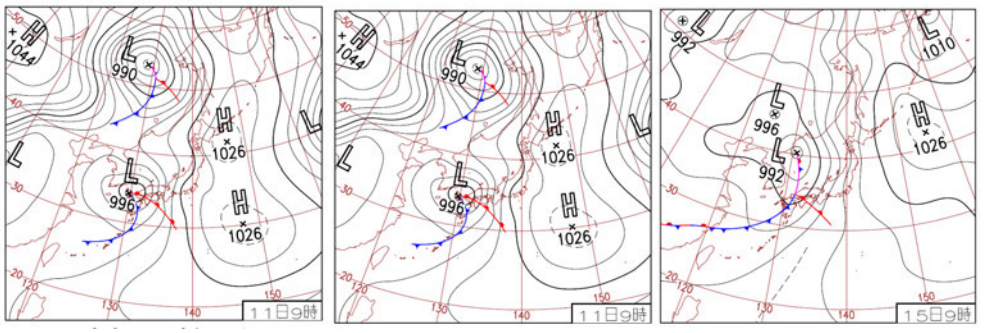
	学習トレース				未知予測			
	全体	低水位	中水位	高水位	全体	低水位	中水位	高水位
漆尾	○	○	○		○	○	○	○
新橋	○	○	○	○	○			
堀	○	○	○	○	○	○	○	○
計	**3（100%）**	**3（100%）**	**3（100%）**	**2（67%）**	**3（100%）**	**2（67%）**	**2（67%）**	**2（67%）**

3.2.5. 出水ピーク・立上り・立下り精度評価

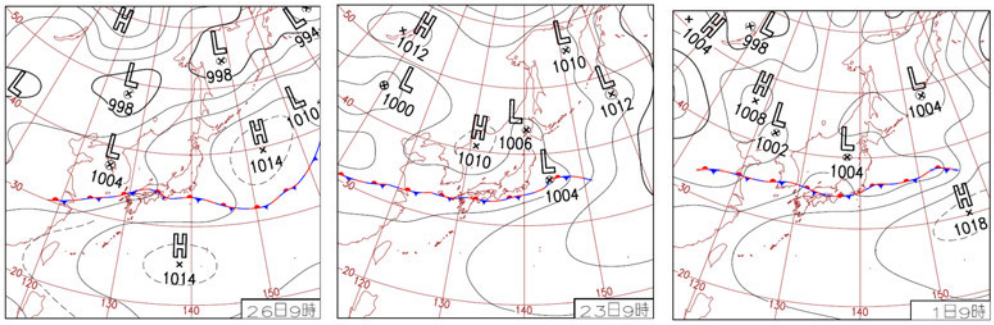
未知データの中で規模の大きな出水１０イベントを抽出し、水位ピークと立上り、立下りの精度評価を実施した。評価対象とした出水ピークの日時を表 3-10 に示し、天気図を図 3-27 に示す。イベント No.はピーク水位の大きい順に割り当てた。

表 3-10　各水位観測所の出水ピーク日時

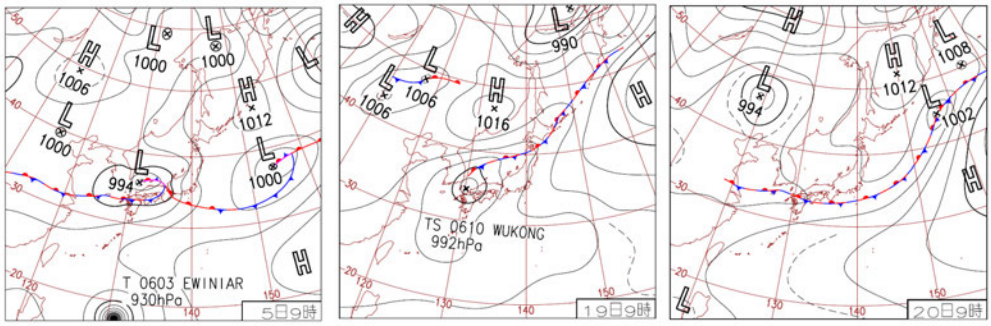
	新橋	気象概況	漆尾	気象概況	堀	気象概況
No.1	2006/6/26 10:00	梅雨前線	2006/6/26 11:00	梅雨前線	2006/6/26 11:00	梅雨前線
No.2	2006/4/11 10:00	低気圧/前線	2006/4/11 13:00	低気圧	2006/4/11 13:00	低気圧
No.3	2006/5/10 21:00	低気圧/前線	2006/7/1 13:00	梅雨前線	2006/7/1 13:00	梅雨前線
No.4	2006/6/23 7:00	梅雨前線	2006/5/10 20:00	低気圧/前線	2006/5/11 1:00	低気圧/前線
No.5	2006/7/1 10:00	梅雨前線	2006/6/23 6:00	梅雨前線	2006/6/23 11:00	梅雨前線
No.6	2006/7/5 4:00	梅雨前線	2006/7/5 2:00	梅雨前線	2006/7/20 15:00	梅雨前線
No.7	2006/7/20 18:00	梅雨前線	2006/6/15 10:00	梅雨前線	2006/7/5 2:00	梅雨前線
No.8	2006/6/15 12:00	梅雨前線	2006/7/20 16:00	梅雨前線	2006/9/9 16:00	秋雨前線
No.9	2006/8/19 14:00	台風第 10 号	2006/9/9 22:00	秋雨前線	2006/6/15 10:00	梅雨前線
No.10	2006/9/10 1:00	秋雨前線	2006/8/19 16:00	台風第 10 号	2006/8/19 14:00	台風第 10 号



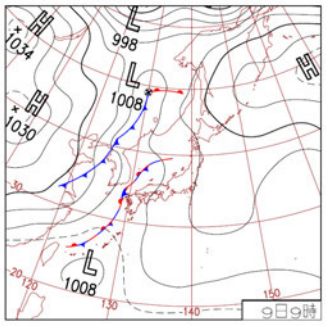
2006/4/11　　2006/5/11　　2006/6/15



2006/6/26　　2006/6/23　　2006/7/1



2006/7/5　　2006/7/19　　2006/7/20



2006/9/9

図 3-27　出水ピーク日の天気図

（1）ピーク評価

各水位観測所のピーク精度評価結果を図 3-28～図 3-30、表 3-11～表 3-13 に示す。いずれの観測所においても±0.5m 以内の誤差に収まっていることが分かる。

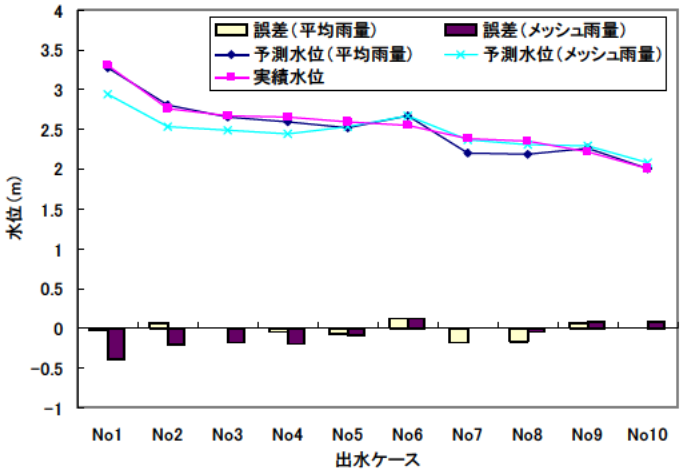


図 3-28　漆尾水位　ピーク精度評価

表 3-11　漆尾水位　ピーク精度評価

	平均雨量			メッシュ雨量		
	予測水位	実績水位	誤差	予測水位	実績水位	誤差
No1	3.27	3.31	-0.04	2.945518	3.34	-0.39448
No2	2.81	2.76	0.05	2.538849	2.76	-0.22115
No3	2.66	2.67	-0.01	2.491436	2.67	-0.17856
No4	2.6	2.65	-0.05	2.4496	2.65	-0.2004
No5	2.52	2.6	-0.08	2.530225	2.62	-0.08977
No6	2.67	2.55	0.12	2.666809	2.55	0.116809
No7	2.2	2.38	-0.18	2.370052	2.38	-0.00995
No8	2.19	2.36	-0.17	2.307225	2.36	-0.05277
No9	2.27	2.22	0.05	2.290686	2.22	0.070686
No10	2	2	0	2.076554	2	0.076554
RMSE			0.095551			0.176639

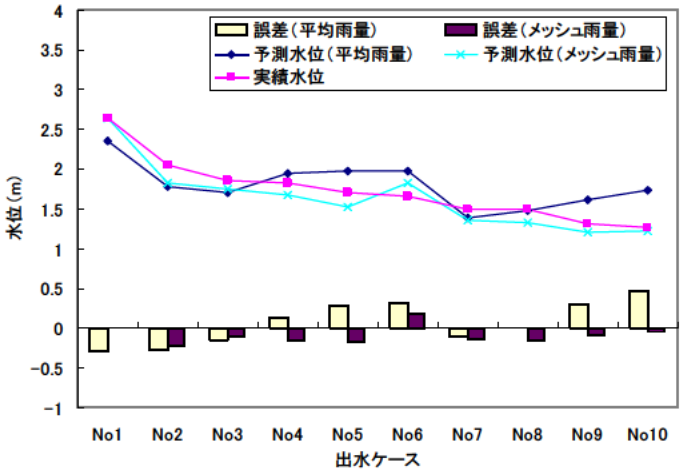


図 3-29　新橋水位　ピーク精度評価

表 3-12　新橋水位　ピーク精度評価

	平均雨量			メッシュ雨量		
	予測水位	実績水位	誤差	予測水位	実績水位	誤差
No1	2.346953	2.64	-0.29305	2.63821	2.64	-0.00179
No2	1.774807	2.05	-0.27519	1.824583	2.05	-0.22542
No3	1.698958	1.86	-0.16104	1.756421	1.86	-0.10358
No4	1.947251	1.82	0.127251	1.673436	1.82	-0.14656
No5	1.980741	1.7	0.280741	1.529323	1.7	-0.17068
No6	1.981156	1.66	0.321156	1.830979	1.66	0.170979
No7	1.393711	1.5	-0.10629	1.360154	1.5	-0.13985
No8	1.480335	1.49	-0.00967	1.333782	1.49	-0.15622
No9	1.613702	1.31	0.303702	1.212557	1.31	-0.09744
No10	1.729199	1.27	0.459199	1.224764	1.27	-0.04524
RMSE			0.264609			0.140318

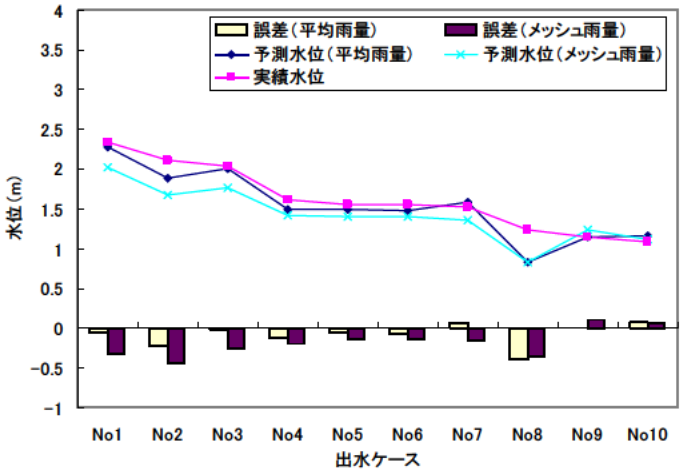


図 3-30　堀水位　ピーク精度評価

表 3-13　堀水位　ピーク精度評価

	平均雨量			メッシュ雨量		
	予測水位	実績水位	誤差	予測水位	実績水位	誤差
No1	2.28	2.34	-0.06	2.026147	2.34	-0.31385
No2	1.88	2.11	-0.23	1.66665	2.11	-0.44335
No3	2.01	2.03	-0.02	1.768221	2.03	-0.26178
No4	1.49	1.62	-0.13	1.413191	1.62	-0.20681
No5	1.49	1.55	-0.06	1.403958	1.54	-0.13604
No6	1.47	1.55	-0.08	1.405603	1.54	-0.1344
No7	1.58	1.52	0.06	1.358333	1.51	-0.15167
No8	0.83	1.23	-0.4	0.820322	1.19	-0.36968
No9	1.14	1.14	0	1.240571	1.14	0.100571
No10	1.16	1.09	0.07	1.111447	1.06	0.051447
RMSE			0.15884			0.248064

平均雨量とメッシュ雨量の違いを比較するため、各出水イベントについてメッシュ雨量よりも平均雨量を用いた方が予測誤差が小さくなるケースを調査した。結果を表 3-14 に示す。新橋観測所を除き、メッシュ雨量より平均雨量を用いた方が誤差が小さくなる割合が高いことが分かる。

表 3-14　メッシュ雨量モデルに対して平均雨量モデルのピーク誤差が小さくなるケース
（観測所名の括弧は雨量メッシュ数）

	小　←　流域面積　→　大		
	堀 (19)	漆尾 (33)	新橋 (46)
No.1	○	○	
No.2	○	○	
No.3	○	○	
No.4	○	○	○
No.5	○	○	
No.6	○		
No.7	○		○
No.8			○
No.9	○	○	
No.10		○	
計	8 (80%)	7 (70%)	3 (30%)

次に、平均雨量とメッシュ雨量のピーク予測誤差を平均した結果を図 3-31 に示す。漆尾と掘ではメッシュ雨量の方が誤差が大きいが、新橋では逆に平均雨量の方が誤差が大きくなっている。流域面積の広い新橋では雨量を平均化したことにより、雨量分布の情報が失われたためと考えられる。

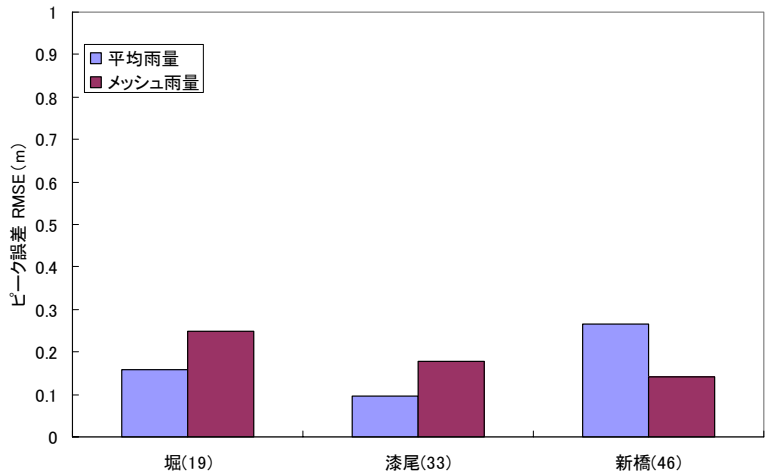


図 3-31　TOP10 出水のピーク誤差比較

（2）立上り・立下り評価

各水位観測所の立上りと立下りの精度評価結果を図 3-32～図 3-37、表 3-15～表 3-17 に示す。いずれの観測所においても±0.4m 以内の誤差に収まっていることが分かる。

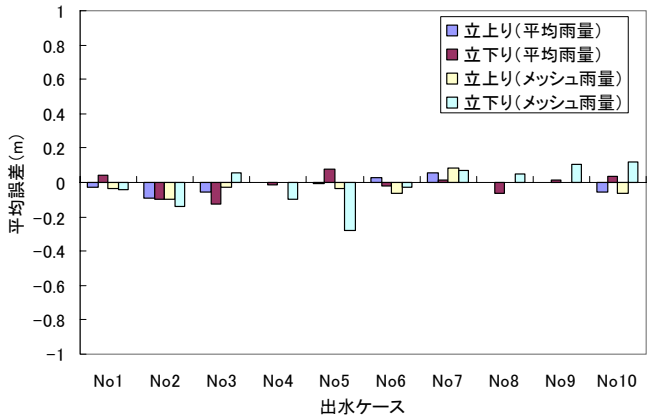


図 3-32　漆尾水位　立上り・立下り精度評価（平均誤差）

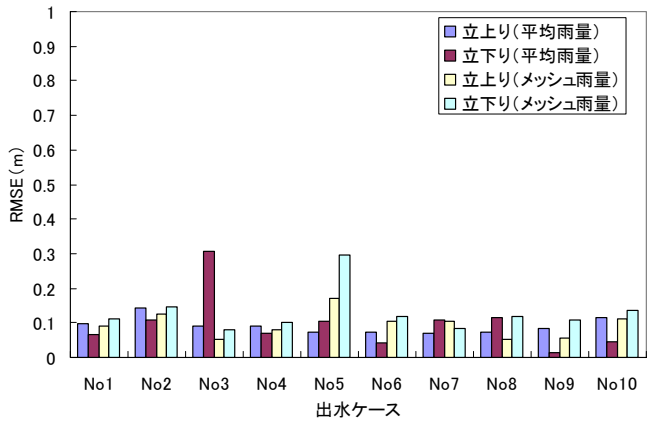


図 3-33　漆尾水位　立上り・立下り精度評価（RMSE）

表 3-15　漆尾水位　立上り・立下り精度評価

	平均雨量				メッシュ雨量			
	平均誤差		RMSE		平均誤差		RMSE	
	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り
No.1	-0.02971	0.042222	0.099188	0.064464	-0.03374	-0.04251	0.08938	0.111554
No.2	-0.09056	-0.10111	0.14199	0.106823	-0.09859	-0.14039	0.125415	0.146694
No.3	-0.05714	-0.12444	0.089523	0.307607	-0.03135	0.056295	0.053742	0.078694
No.4	-0.00033	-0.01667	0.089722	0.068232	0.0027	-0.09862	0.080419	0.102603
No.5	-0.00656	0.077778	0.074435	0.102848	-0.03653	-0.27659	0.170735	0.297775
No.6	0.027273	-0.02222	0.073237	0.040552	-0.06558	-0.02593	0.105886	0.120059
No.7	0.053333	0.016667	0.070946	0.108269	0.084975	0.073175	0.105876	0.081931
No.8	-1.5E-17	-0.06444	0.074297	0.115758	0.000687	0.051418	0.053143	0.11982
No.9	-0.00118	0.011111	0.082924	0.014907	-0.00253	0.106179	0.054207	0.108016
No.10	-0.05786	0.037778	0.116282	0.046667	-0.06176	0.1194	0.110058	0.136601

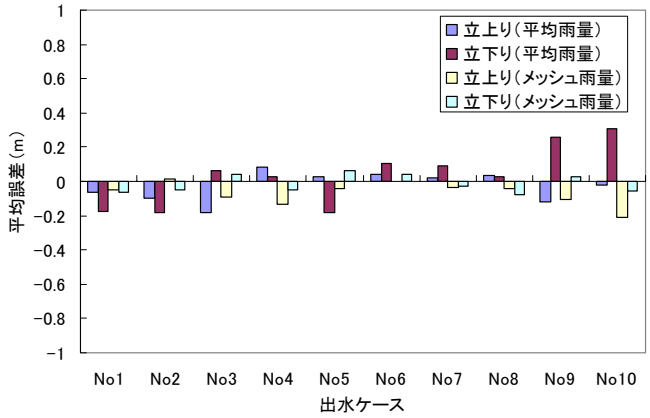


図 3-34　新橋水位　立上り・立下り精度評価（平均誤差）

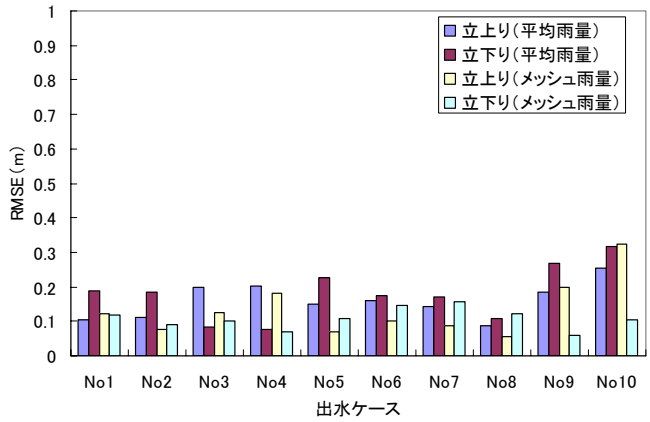


図 3-35　新橋水位　立上り・立下り精度評価（RMSE）

表 3-16　新橋水位　立上り・立下り精度評価

	平均雨量				メッシュ雨量			
	平均誤差		RMSE		平均誤差		RMSE	
	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り
No.1	-0.06225	-0.17781	0.105658	0.189402	-0.04907	-0.06339	0.12249	0.119737
No.2	-0.10137	-0.18274	0.110559	0.18458	0.014456	-0.05033	0.076557	0.091709
No.3	-0.18138	0.063717	0.198652	0.082681	-0.09045	0.038753	0.12635	0.099616
No.4	0.085998	0.029363	0.201787	0.075938	-0.13474	-0.04689	0.182421	0.069853
No.5	0.027565	-0.18157	0.151441	0.227444	-0.04006	0.064899	0.068845	0.108672
No.6	0.04339	0.101844	0.161944	0.174797	0.002633	0.044639	0.10223	0.145086
No.7	0.021977	0.090032	0.143272	0.170892	-0.03243	-0.02566	0.087139	0.158165
No.8	0.036334	0.028401	0.088581	0.106367	-0.03949	-0.07551	0.055472	0.122284
No.9	-0.12079	0.2609	0.185051	0.267096	-0.10692	0.029608	0.197863	0.059919
No.10	-0.02199	0.310588	0.252757	0.318317	-0.20794	-0.05896	0.323347	0.104327

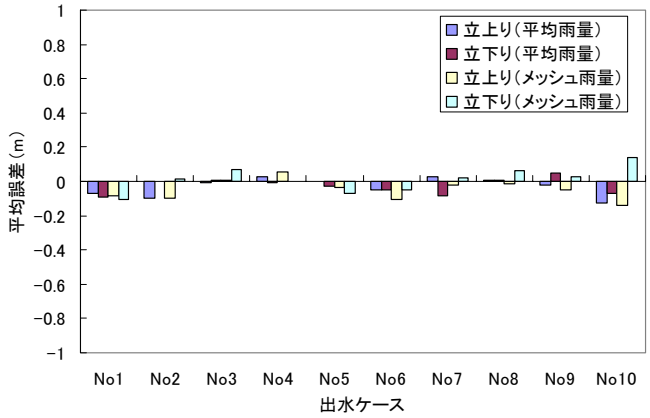


図 3-36　堀水位　立上り・立下り精度評価（平均誤差）

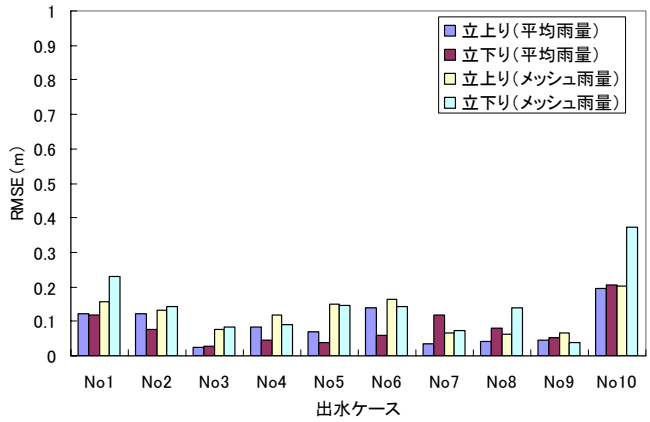


図 3-37　堀水位　立上り・立下り精度評価（RMSE）

表 3-17　堀水位　立上り・立下り精度評価

	平均雨量				メッシュ雨量			
	平均誤差		RMSE		平均誤差		RMSE	
	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り
No.1	-0.0669	-0.08778	0.123232	0.118369	-0.08688	-0.10821	0.155305	0.22963
No.2	-0.09524	0.002222	0.123443	0.077603	-0.09744	0.012547	0.134018	0.141271
No.3	-0.00769	0.004444	0.025115	0.02708	0.005623	0.069727	0.077951	0.082714
No.4	0.0304	-0.00556	0.082849	0.045826	0.059091	-0.00268	0.118441	0.089885
No.5	-0.00345	-0.03	0.0711	0.036968	-0.03542	-0.06859	0.14983	0.14514
No.6	-0.04636	-0.04778	0.140032	0.059907	-0.10476	-0.04734	0.16377	0.14125
No.7	0.0275	-0.08222	0.033166	0.119722	-0.01942	0.023354	0.065437	0.071989
No.8	0.006923	0.006667	0.041971	0.08165	-0.0114	0.064122	0.06212	0.139101
No.9	-0.02083	0.048889	0.046098	0.050772	-0.04547	0.028522	0.067842	0.039065
No.10	-0.12375	-0.07	0.195863	0.203879	-0.13926	0.14093	0.201527	0.373801

平均雨量とメッシュ雨量の違いを比較するため、各出水イベントについてメッシュ雨量よりも平均雨量を用いた方が予測誤差が小さくなるケースを調査した。結果を表 3-18 に示す。新橋観測所を除き、メッシュ雨量より平均雨量を用いた方が誤差が小さくなる割合が高いことが分かる。これはピーク評価で得られた結果と同様に、流域面積の広い新橋では雨量の平均化による雨量分布情報の欠落が、誤差増加の原因と考えられる。

表 3-18　メッシュ雨量モデルに対して平均雨量モデルの立上り・立下り誤差が小さくなるケース

（観測所名の括弧は雨量メッシュ数）

	小　←　流域面積　→　大					
	堀 (19)		漆尾 (33)		新橋 (46)	
ケース	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り
No.1	○	○		○	○	
No.2	○	○		○		
No.3	○	○				○
No.4	○	○		○		
No.5	○	○	○	○		
No.6	○	○	○	○		
No.7	○		○			
No.8	○	○		○		○
No.9	○			○	○	
No.10	○	○		○	○	
計	10 (100%)	8 (80%)	3 (30%)	8 (80%)	3 (30%)	2 (20%)

3.2.6. 学習データの範囲と未知データの範囲

計算に用いた学習データと未知データの水位、雨量、ダム放流量の最大/最小値を図 3-38～図 3-40 に示す。平均雨量モデルではすべてのケースで未知データが学習データの範囲内に収まっているが、メッシュ雨量モデルでは学習範囲を超過しているケースが多いことが分かる。学習データが十分揃っている場合にはメッシュ雨量モデルを用いても安定した予測を行えると考えられるが、十分揃っていない場合には平均雨量モデルに比べて不安定性が増すと考えられる。ただし、新橋観測所では雨量の平均化による情報の欠落で精度が低下することがあるため、流域面積に応じて雨量の平均化を行う必要があると考えられる。

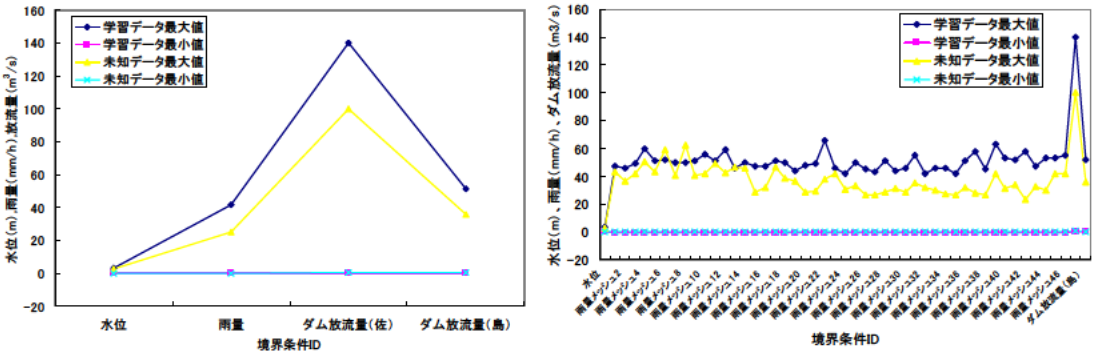


図 3-38　新橋モデルの要素別データ範囲（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

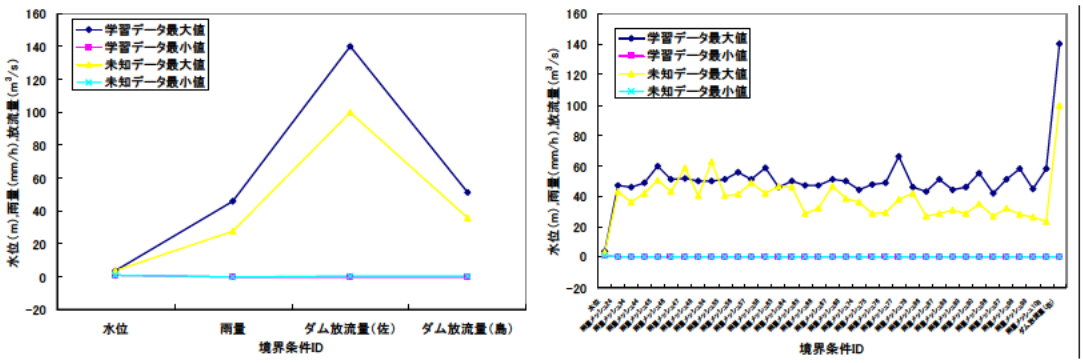


図 3-39　漆尾モデルの要素別データ範囲（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

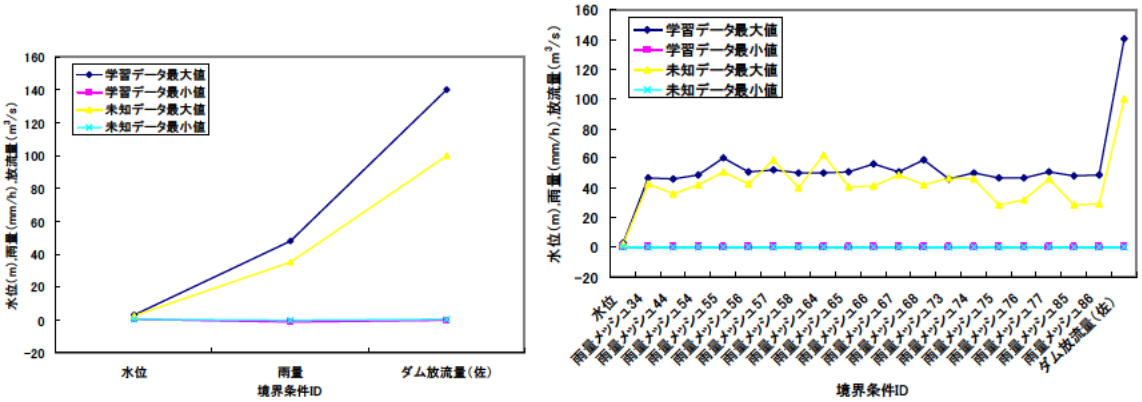


図 3-40　堀モデルの要素別データ範囲（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

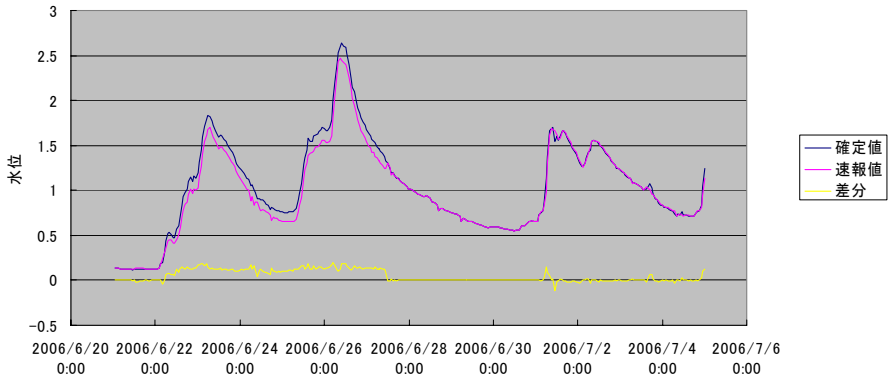
3.2.7. まとめ

佐波川の事例では、2年分のデータを用いて新橋、漆尾、堀の各水位予測モデルを構築し、それ以外の1年分のデータで予測検証を実施した。本流域には佐波川ダム、島地川ダムの２つのダムがあり、予測地点の水位はダム放流量の影響を受ける。そこで本解析ではモデルの入力条件にダム放流量を追加し、ダム放流量と降雨の両方を考慮した水位予測モデルを構築した。水位の高さごとに予測先行時間と予測誤差の関係を検証した結果、予測先行時間が大きくなるほど予測誤差も大きくなるものの、6時間先の予測においてもRMSE誤差が10cm以内に収まっており、実用上十分な予測精度であることを確認した。また、学習トレースと未知データ予測の精度比較を行ったところ、学習トレースではいずれの水位観測地点においても平均雨量を用いた方が高精度であったが、未知データ予測では流域面積の大きい新橋水位でメッシュ雨量を用いた方が高精度であった。また未知データの中から10出水を抽出し、立上り・ピーク・立下りの精度評価を実施した結果、流域面積が小さい堀、漆尾地点では平均雨量を用いた方が予測精度が高く、流域面積の大きい新橋地点ではメッシュ雨量を用いた方が精度が高くなることを確認した。これは、流域面積が広くなると雨量の平均化によって雨量の分布情報が欠落するためと考えられる。本検証の結果、流域面積の大きさに応じて適切な雨量メッシュデータを入力することにより、実用上十分な精度の予測モデルを構築できることを確認した。一般的な河川流域では、上流にダム施設が設置されていることが多く、本手法の適用によりダム設備を有する全国の河川流域において高精度な水位予測モデルを構築できるものと期待される。

＜補足＞

水文水質データベースに掲載されている2006/6/22～6/27の水位データが速報値から確定値に変更されていることを確認した。数値を比較したところ確定値は速報値よりも20cm程度高めに修正されていた。6/26 9:00のピーク付近に関しては洪水流況観測を実施した際の量水標と電送データの誤差を元に補正したとのことであるが、6/22～6/25については修正した記録は残っていない。

現地の水位計はフロート式と水晶式の２重化を行っているが、切り替え時の不整合が生じた可能性がある。また、フロート式の水位計は低水位と高水位の2段構成となっており、フロートが引っかかるなどの理由で誤差が生じた可能性もある。



3.3. 遠賀川水位予測解析

遠賀川の水位予測シミュレーションの検討を実施した。対象流域とデータの概要を以下に示す。

（1）水系

水系：遠賀川（1級河川）

延長：61km

流域面積：1026km^2

流域：福岡県

管理：国土交通省九州地方整備局遠賀川河川事務所

（2）データ期間

2002年1月～2006年12月の1時間データ

（3）実績水位

大隈、川島、勘六橋、日の出橋、野面、祇園橋、宮田橋、添田、夏吉、秋松橋の各水位観測所データ

表 3-19　水位観測データ概要

水位観測所	指定水位 (m)	警戒水位 (m)	特別警戒水位 (m)	危険水位 (m)	計画水位 (m)	豊水位 (m)	流域面積 (km^2)
大隈	1.30	2.00	-	-	3.74	0.51	43.7
川島	2.30	3.60	4.70	5.40	6.09	0.06	294.1
勘六橋	3.80	5.20	-	-	7.78	0.14	369.9
日の出橋	4.60	5.90	7.10	7.70	8.46	1.27	686.8
野面	2.00	2.40	2.70	2.94	2.94	0.28	8.1
祇園橋	-	-	-	-	-	1.65	59.0
宮田橋	4.00	5.50	5.70	5.90	7.17	0.05	123.0
添田	2.30	3.40	-	-	4.36	0.94	63.6
夏吉	2.10	3.10	3.70	4.57	4.98	0.29	47.0
秋松橋	3.00	4.20	5.40	6.17	6.47	0.3	121.7

（4）実績雨量

気象庁レーダーアメダス解析雨量（2.5kmメッシュ）

（5）実績気圧、風向、風速

気象庁気象台　福岡地点

（6）天文潮位

気象庁潮位表　下関地点

（７）流域配置図

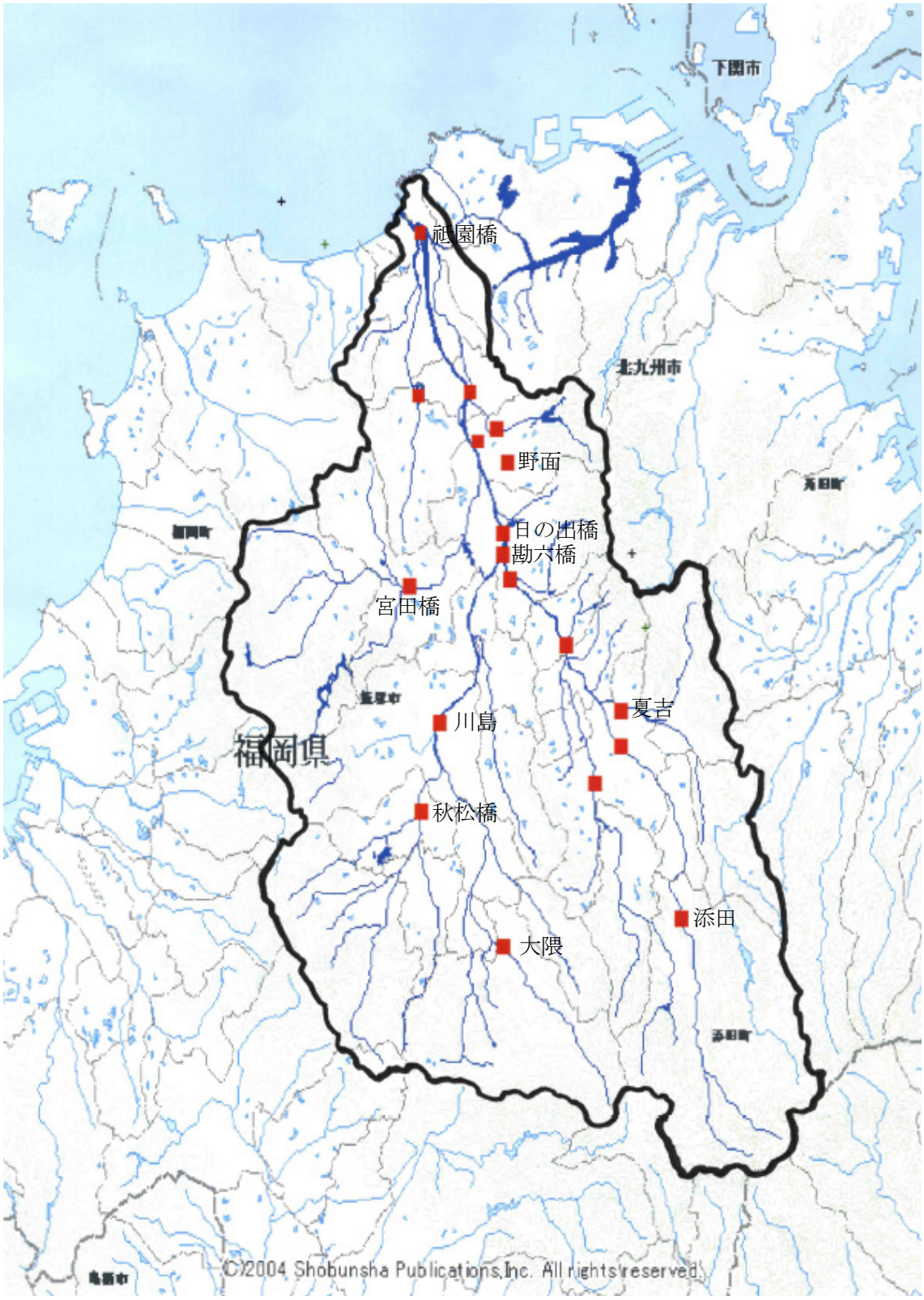


図 3-41　遠賀川流域配置図

3.3.1. 遠賀川水位予測モデルの構築

水位予測モデルの作成に用いたデータは水位とレーダーアメダス解析雨量の時間データとし、感潮区間の祇園橋においては潮位偏差の実験式[7]を参考に天文潮位、気圧、風圧のデータも追加した。学習期間は2002～2005年、予測期間は2006年とした。

非感潮域と感潮域の水位予測モデルの入出力関係を式3-4～式3-6に示す。また、式中の過去参照時間を表3-20に示す。精度比較のため、メッシュ雨量を1要素に単純平均してから入力する「平均雨量モデル」と、メッシュ雨量を平均化せずにメッシュ数分の要素で入力する「メッシュ雨量モデル」をそれぞれ構築した。

通常モデル：

$$H(t+1)=f(H(t),...,H(t-t_H+1),R(t+1),...,R(t-t_R+2))) \quad \text{式 3-4}$$

感潮域モデル：

$$H(t+1)=f\begin{pmatrix}H(t),...,H(t-t_H+1),R(t+1),...,R(t-t_R+2),\\S(t+1),...,S(t-t_S+2),P(t+1),...,P(t-t_P+2),\\W(t+1),...,W(t-t_W+2)\end{pmatrix} \quad \text{式 3-5}$$

$$W=V^2\cos\theta \quad \text{式 3-6}$$

ここで、H：水位、R：雨量、S：天文潮位、P：気圧、W：湾軸方向風圧、V：風速、θ：風向、t：時間である。

表 3-20　過去参照時間

水位観測所	t_H	t_R	t_S	t_P	t_W
夏吉	18	3	-	-	-
勘六橋	18	7	-	-	-
祇園橋	25	8	27	7	26
宮田橋	18	8	-	-	-
秋松橋	18	5	-	-	-
川島	18	3	-	-	-
大隈	18	4	-	-	-
添田	18	7	-	-	-
日の出橋	18	7	-	-	-
野面	18	2	-	-	-

解析では６時間先までの実績雨量/天文潮位/気圧/風向風速を用い６時間先までの水位を予測した。表 3-21 に時刻 t の実績水位 $H(t)$を初期値とし、1 時刻先の $H(t+1)$の水位を予測する場合の入出力データを示す。$H(t+6)$を計算するためには、これを６ステップ繰り返す。ただし、$H(t+2)$から $H(t+5)$は各ステップの計算値が入る。

表 3-21　水位予測計算の入出力データ

時刻	水位	レーダ雨量	天文潮位	気圧	風圧
$t-t_W+2$	・・・	・・・	・・・	・・・	$W(t-t_W+2)$
・・・	・・・	・・・	・・・	・・・	・・・
$t-t_P+2$	・・・	・・・	・・・	$P(t-t_P+2)$	・・・
・・・	・・・	・・・	・・・	・・・	・・・
$t-t_S+2$	・・・	・・・	$S(t-t_S+2)$	・・・	・・・
・・・	・・・	・・・	・・・	・・・	・・・
$t-t_R+2$	・・・	$R(t-t_R+2)$	・・・	・・・	・・・
・・・	・・・	・・・	・・・	・・・	・・・
$t-t_H+1$	$H(t-t_H+1)$	・・・	・・・	・・・	・・・
・・・	・・・		・・・	・・・	・・・
t	$H(t)$	$R(t)$	$S(t)$	$P(t)$	$W(t)$
$t+1$	$H_p(t+1)$	$R(t+1)$	$S(t+1)$	$P(t+1)$	$W(t+1)$

入力に用いた雨量メッシュを図 3-42～図 63 に示す。メッシュサイズは 2.5km で、太線領域は各水位予測モデルの境界条件として使用した雨量メッシュである。太線領域の北西端を起点として東方向に向かってメッシュ番号を１から付与し、東端まで到達したら１メッシュ南の西端から継続して番号を付与した。

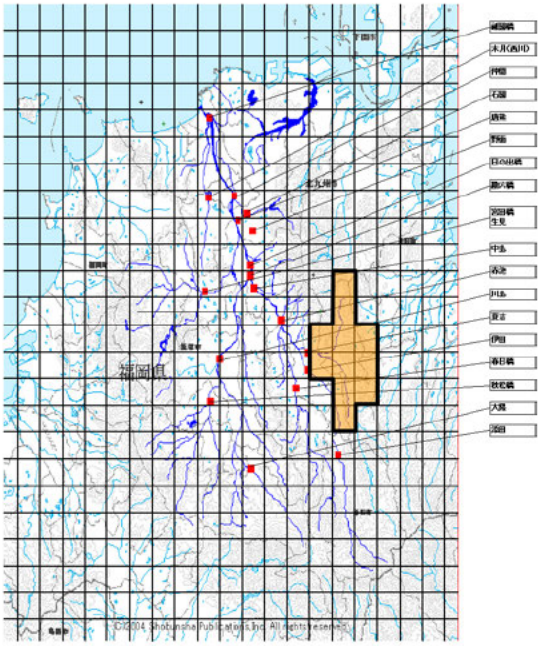


図 3-42　夏吉水位（11 メッシュ）

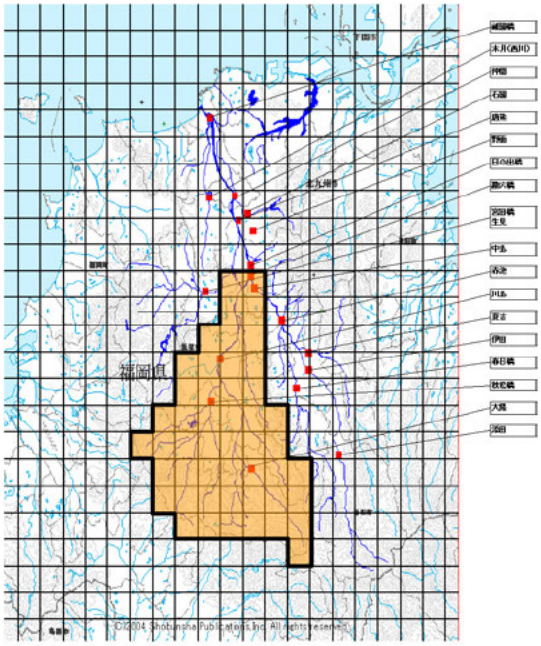


図 3-43　勘六橋水位（49 メッシュ）

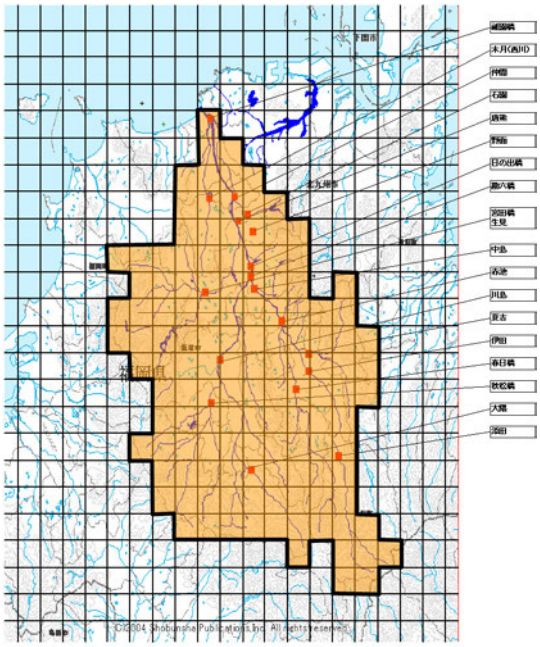


図 3-44　祇園橋水位（132 メッシュ）

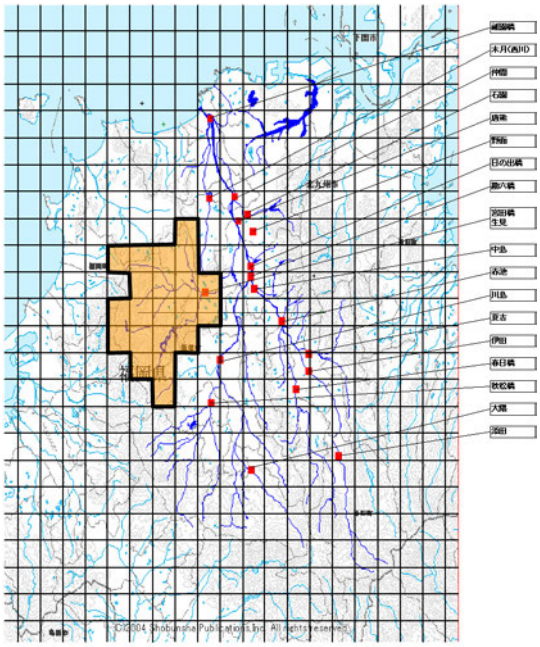


図 3-45　宮田橋水位（21 メッシュ）

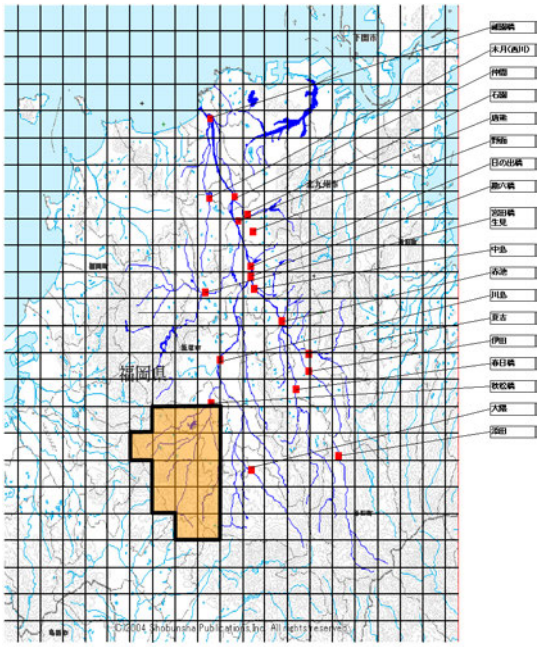


図 3-46　秋松橋水位（15 メッシュ）

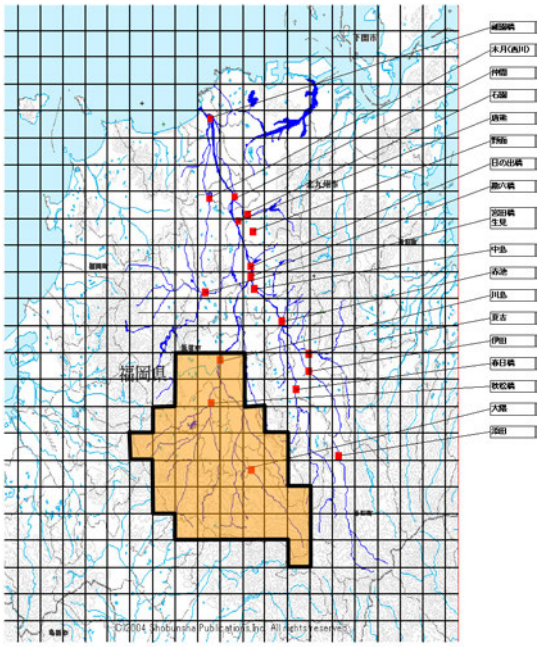


図 3-47　川島水位（38 メッシュ）

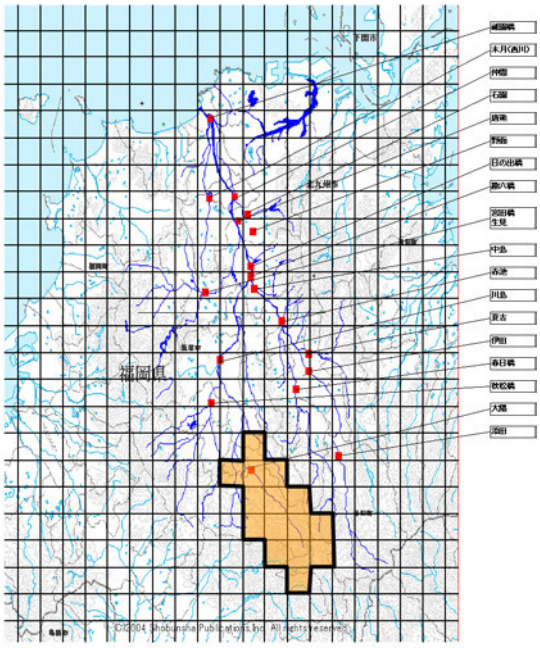


図 3-48　大隈水位（15 メッシュ）

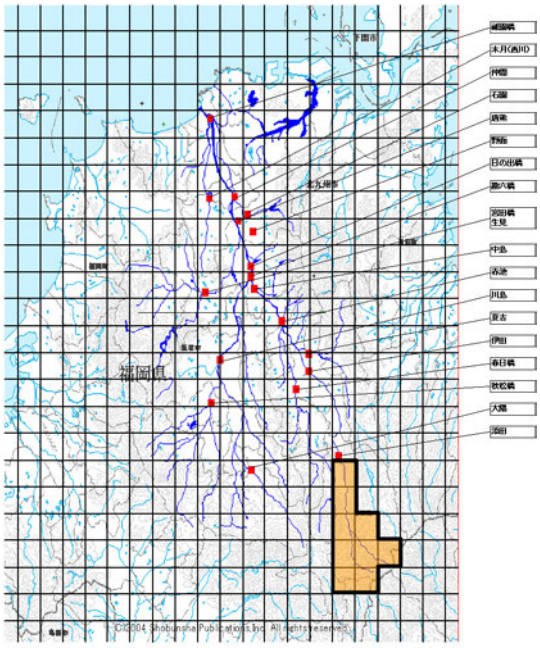


図 3-49　添田水位（9 メッシュ）

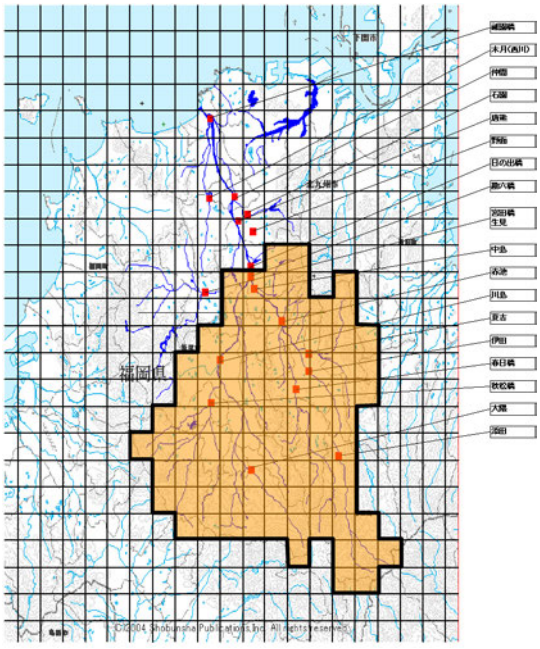


図 3-50　日の出橋水位（91 メッシュ）

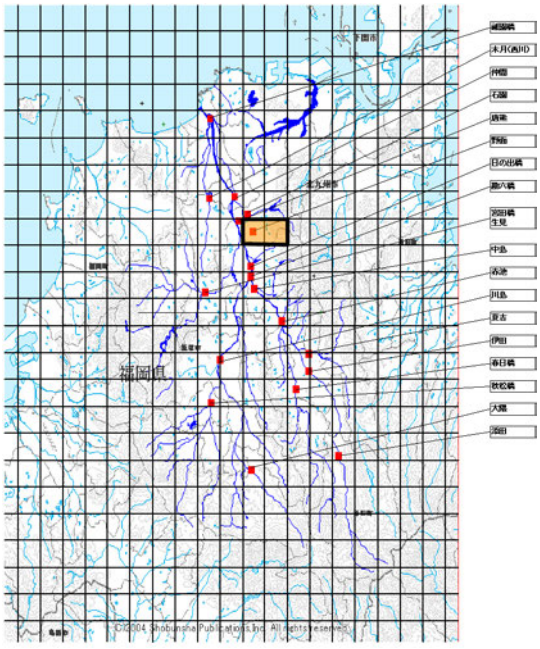


図 3-51　野面水位（2 メッシュ）

3.3.2. 学習トレース結果

学習が十分に行われたかを確認するため、学習に用いたデータを用いて水位予測計算を実施した。各観測所における平均雨量モデルの結果とメッシュ雨量モデルの結果を図 3-52～図 3-71 に示す。

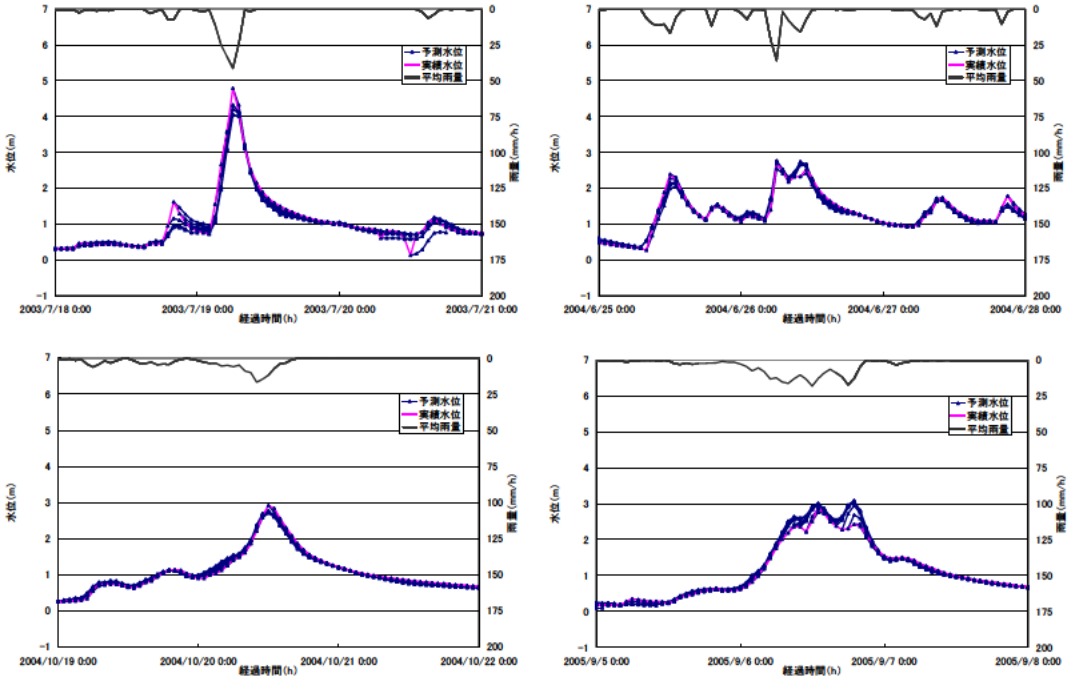


図 3-52　夏吉水位　学習トレース結果（平均雨量）

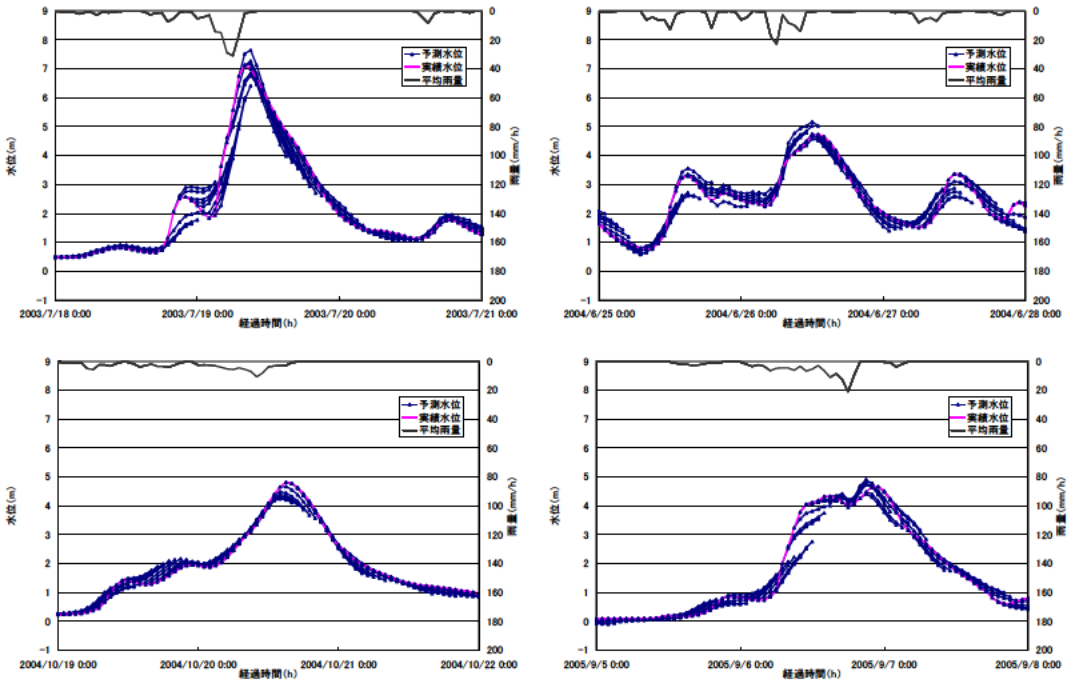


図 3-53　勘六橋水位　学習トレース結果（平均雨量）

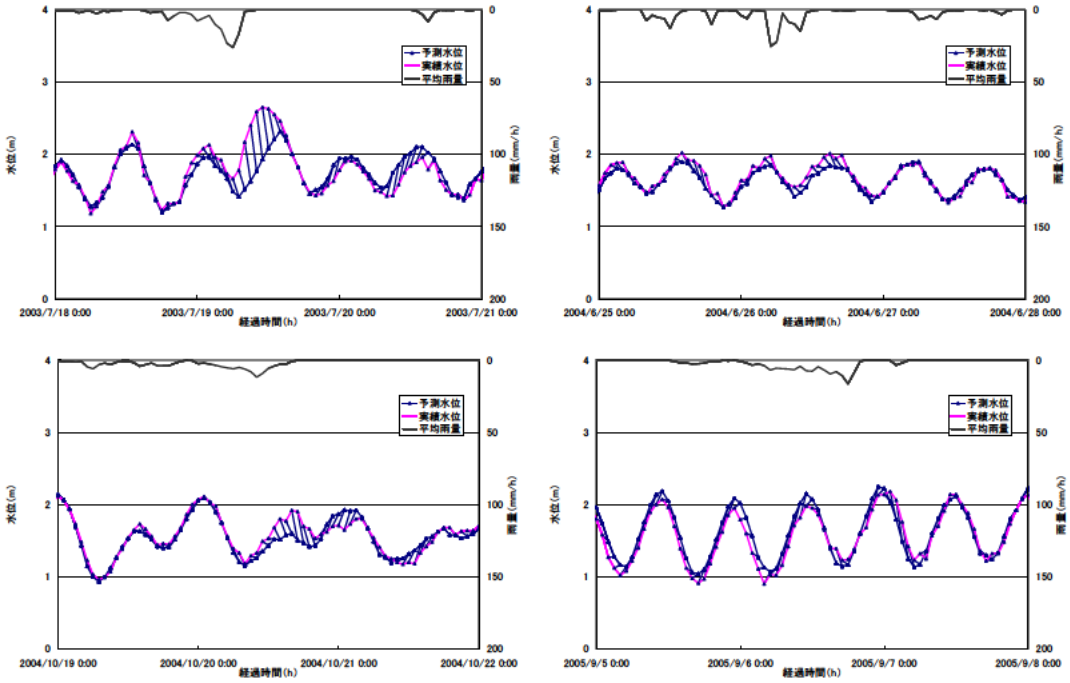


図 3-54　祇園橋水位　学習トレース結果（平均雨量）

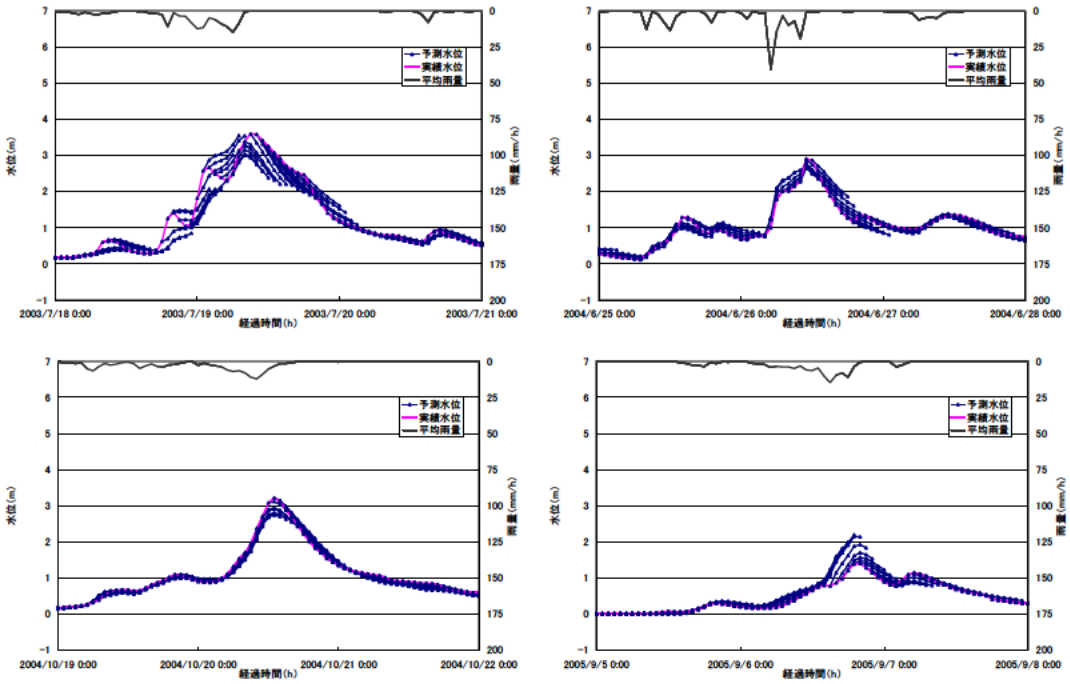


図 3-55　宮田橋水位　学習トレース結果（平均雨量）

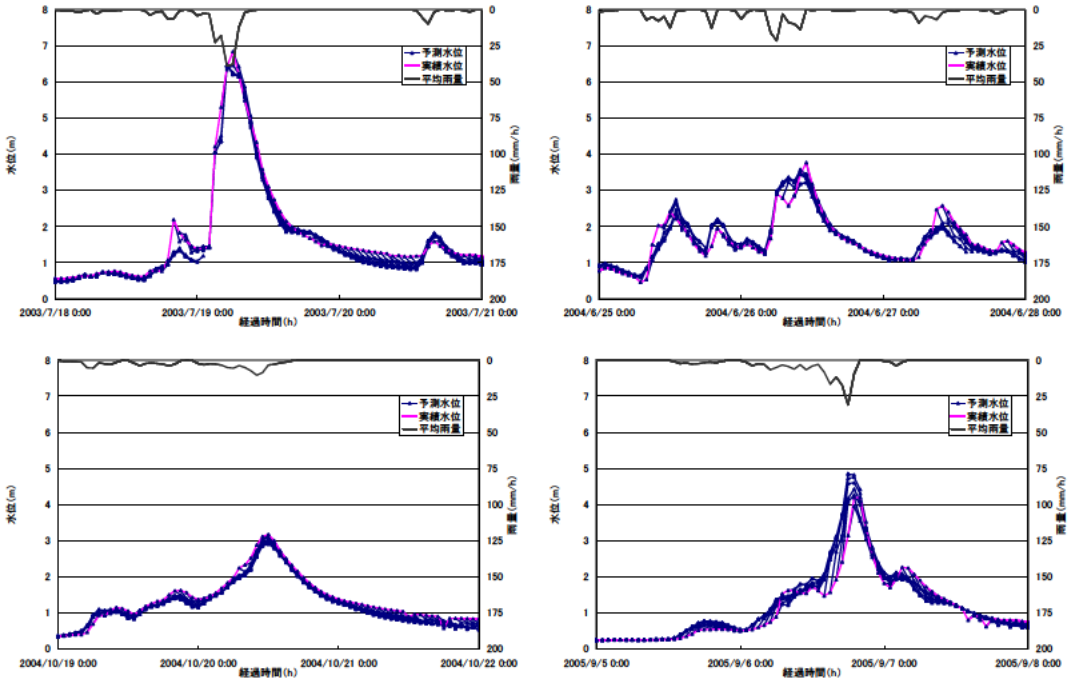


図 3-56　秋松橋水位　学習トレース結果（平均雨量）

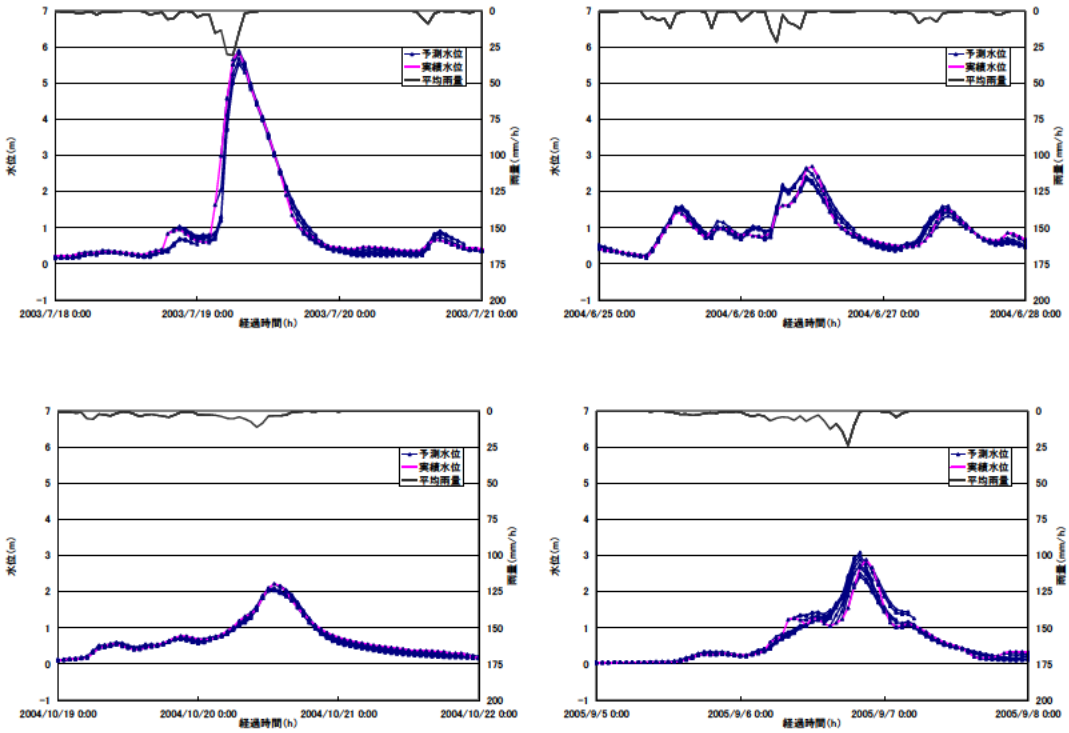


図 3-57　川島水位　学習トレース結果（平均雨量）

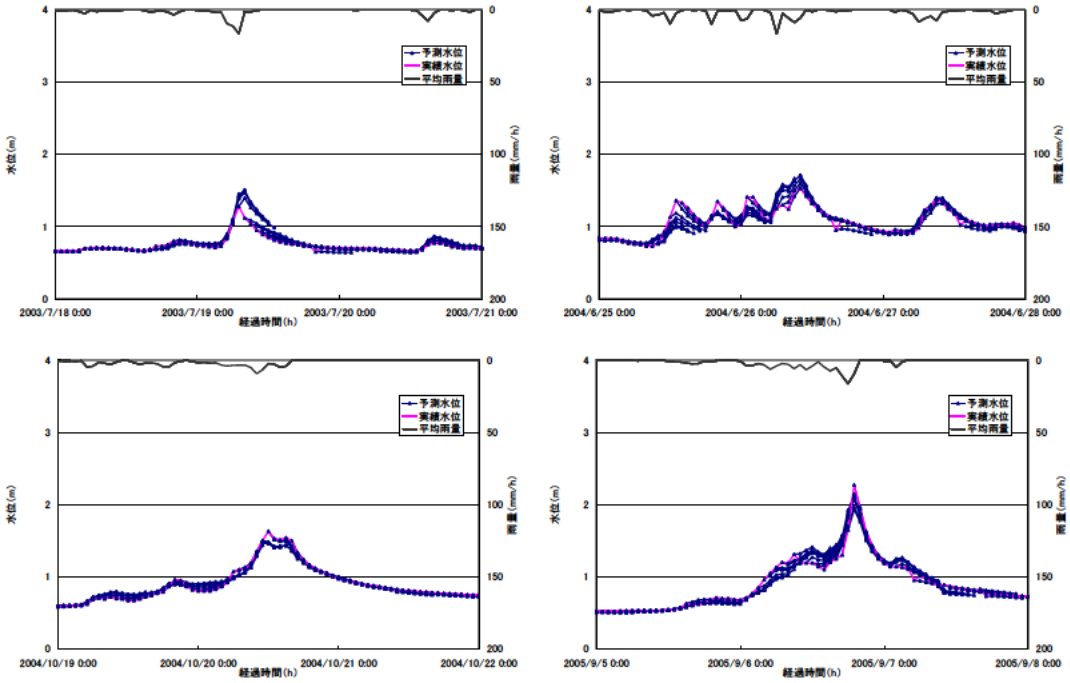


図 3-58　大隈水位　学習トレース結果（平均雨量）

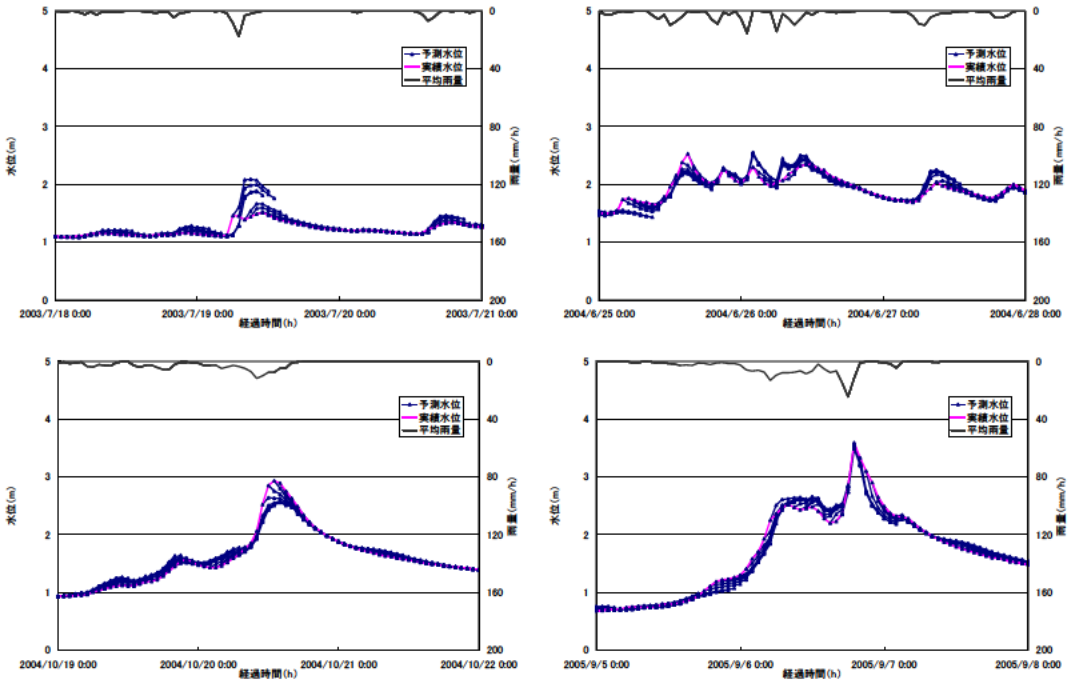


図 3-59　添田水位　学習トレース結果（平均雨量）

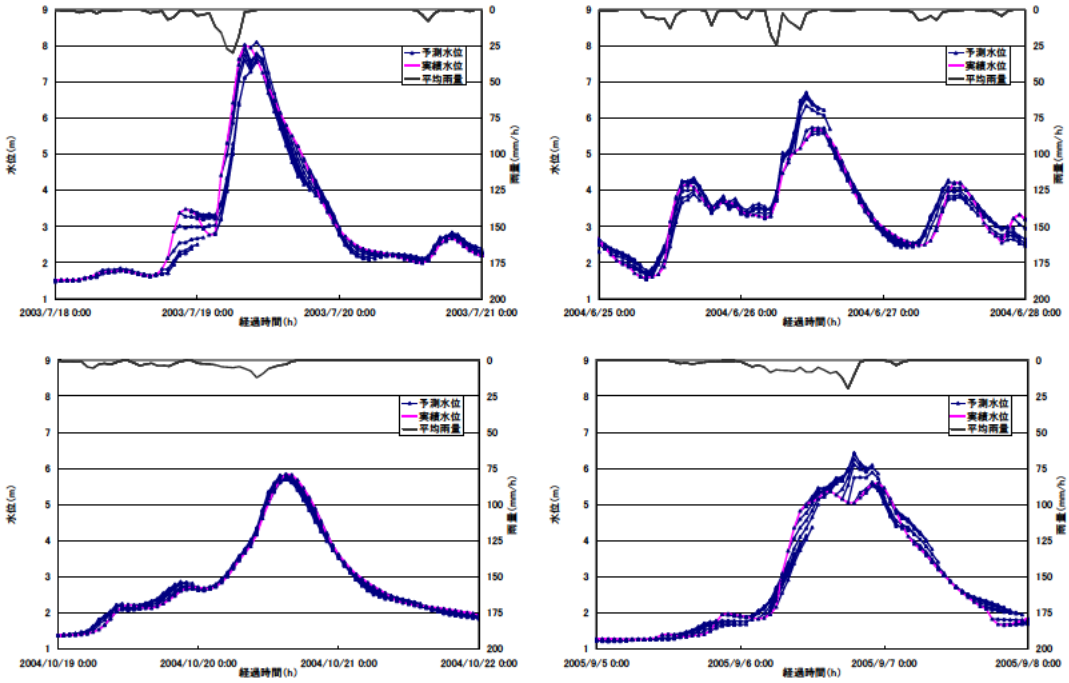


図 3-60　日の出橋水位　学習トレース結果（平均雨量）

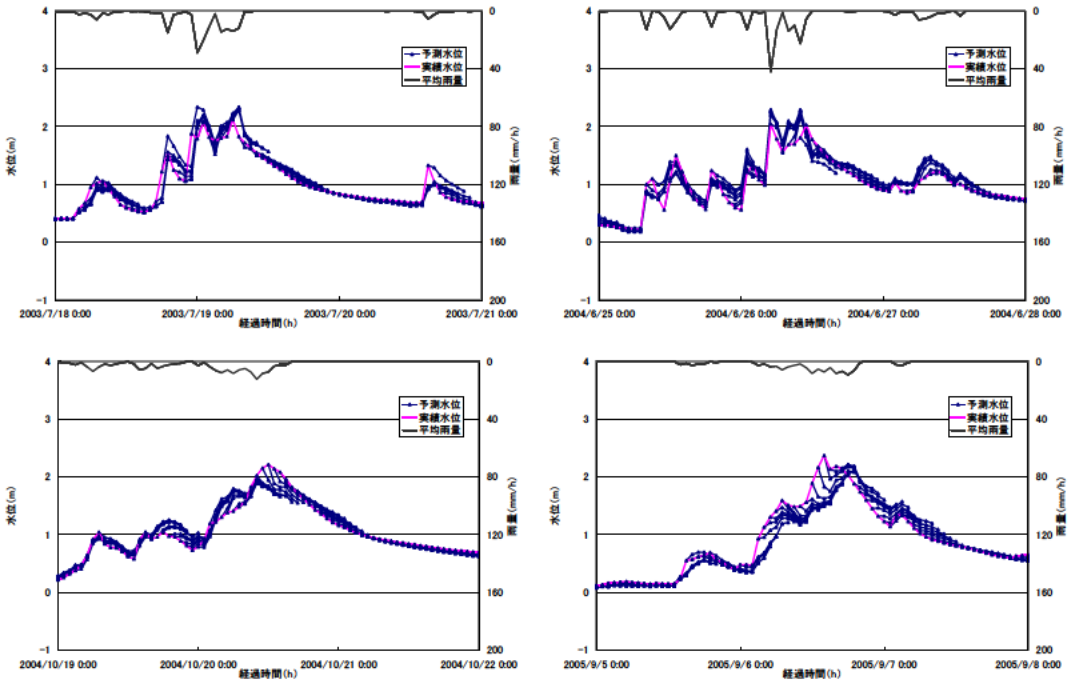


図 3-61　野面水位　学習トレース結果（平均雨量）

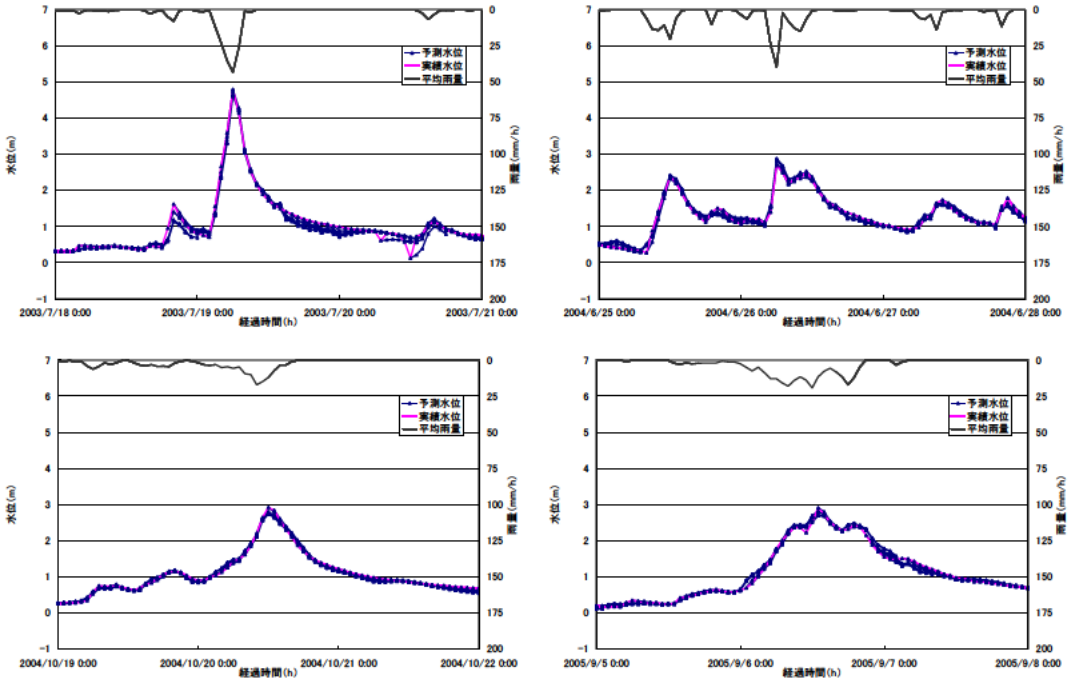


図 3-62　夏吉水位　学習トレース結果（メッシュ雨量）

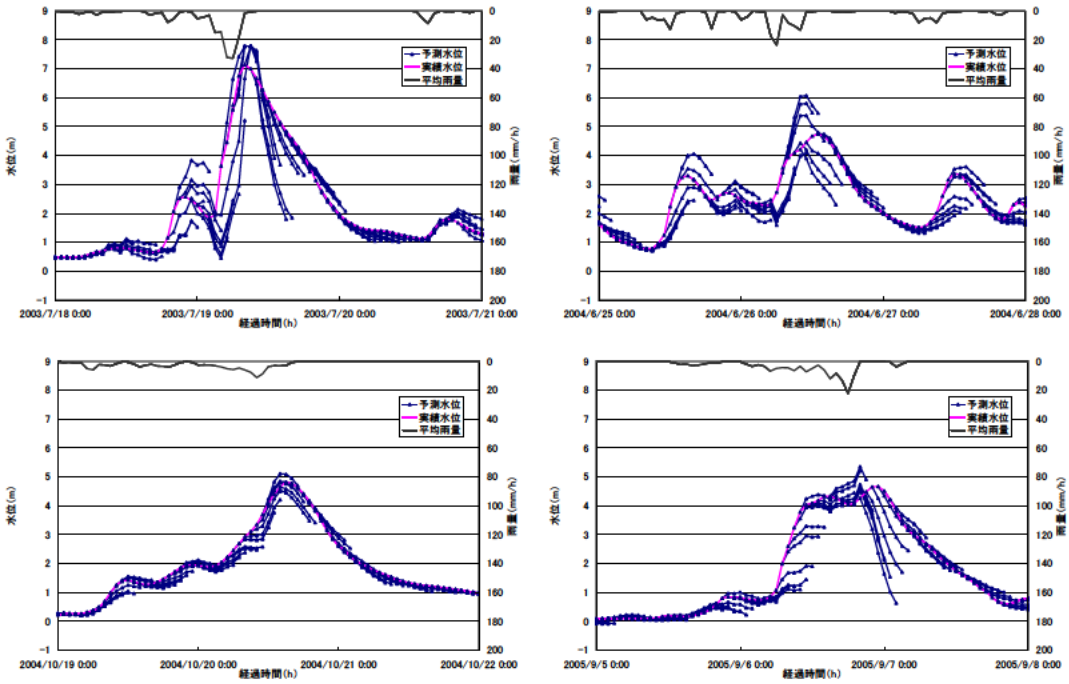


図 3-63　勘六橋水位　学習トレース結果（メッシュ雨量）

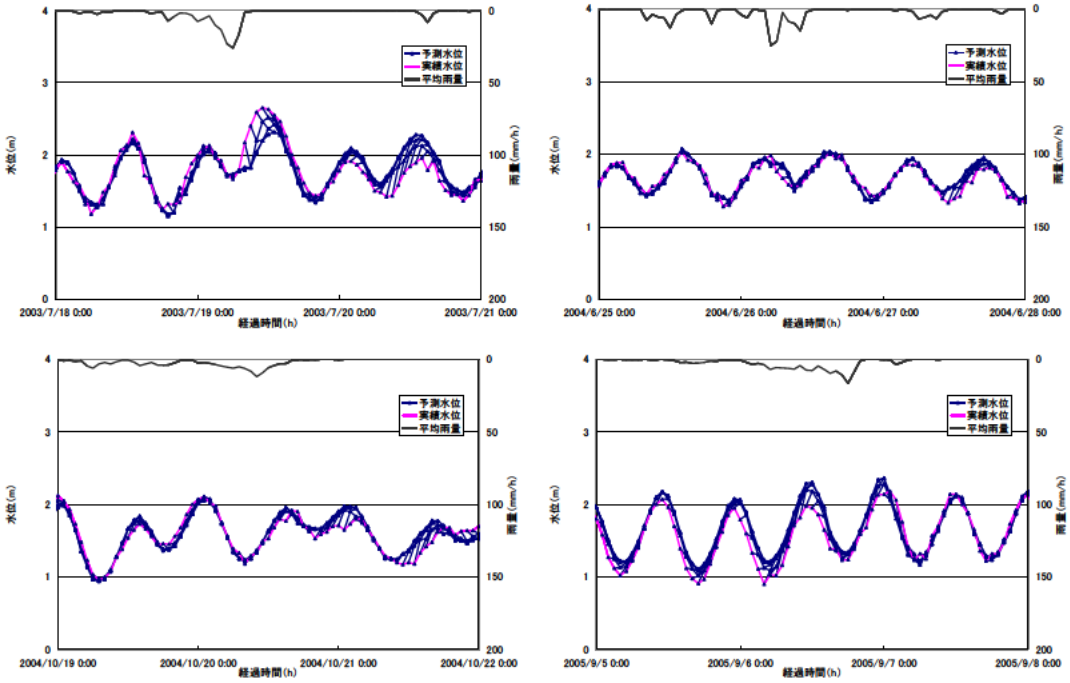


図 3-64　祇園橋水位　学習トレース結果（メッシュ雨量）

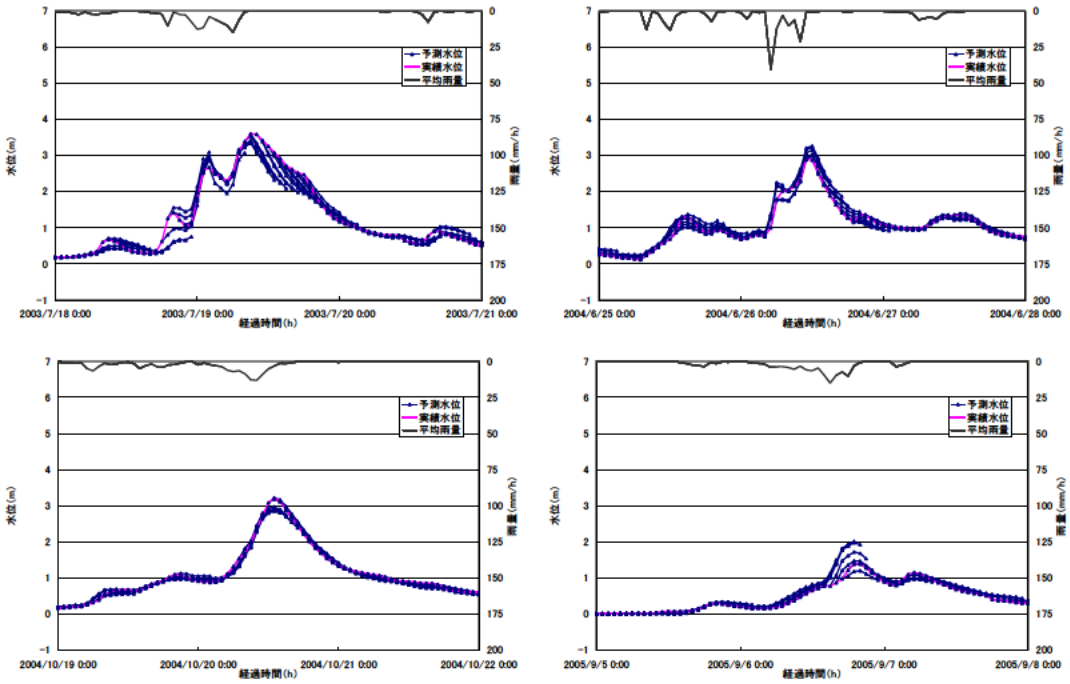


図 3-65　宮田橋水位　学習トレース結果（メッシュ雨量）

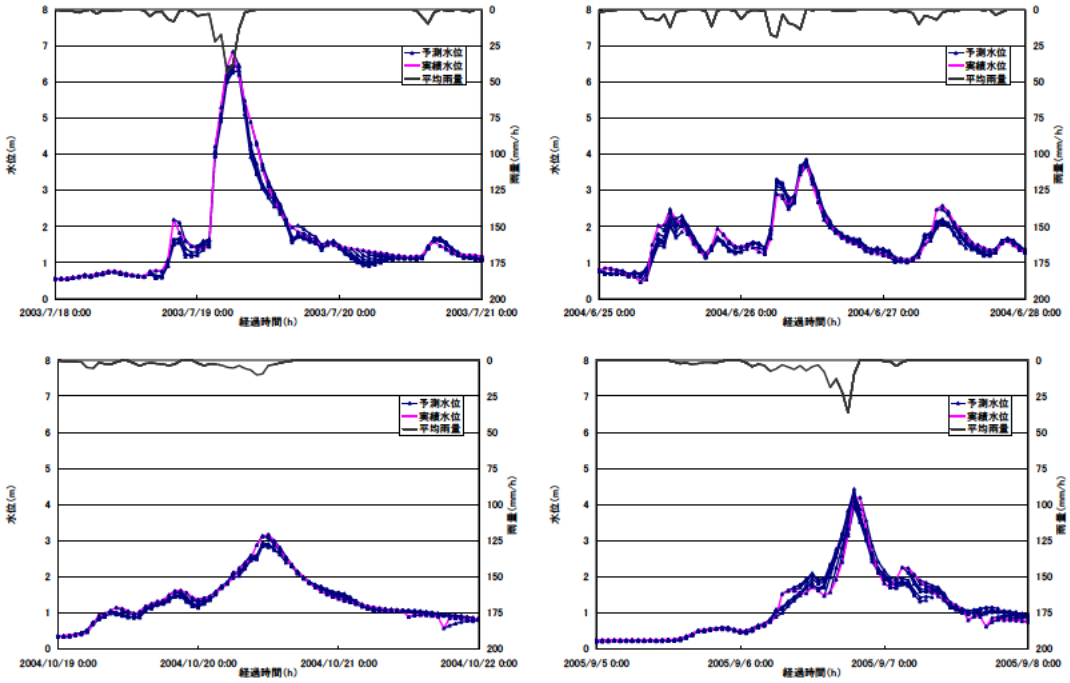


図 3-66　秋松橋水位　学習トレース結果（メッシュ雨量）

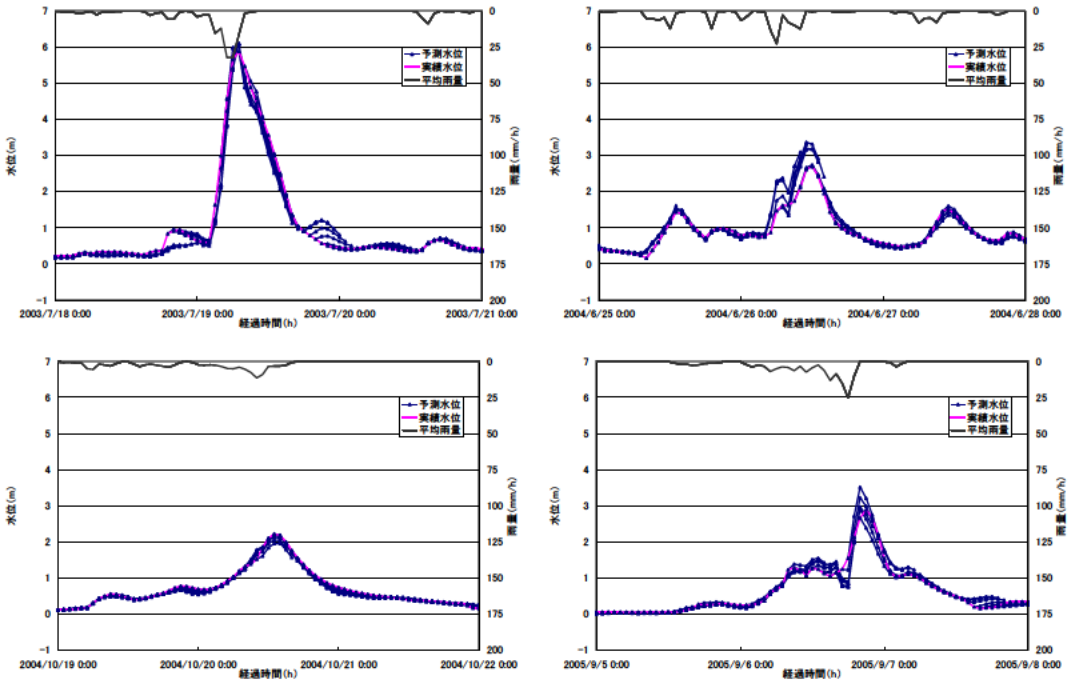


図 3-67　川島水位　学習トレース結果（メッシュ雨量）

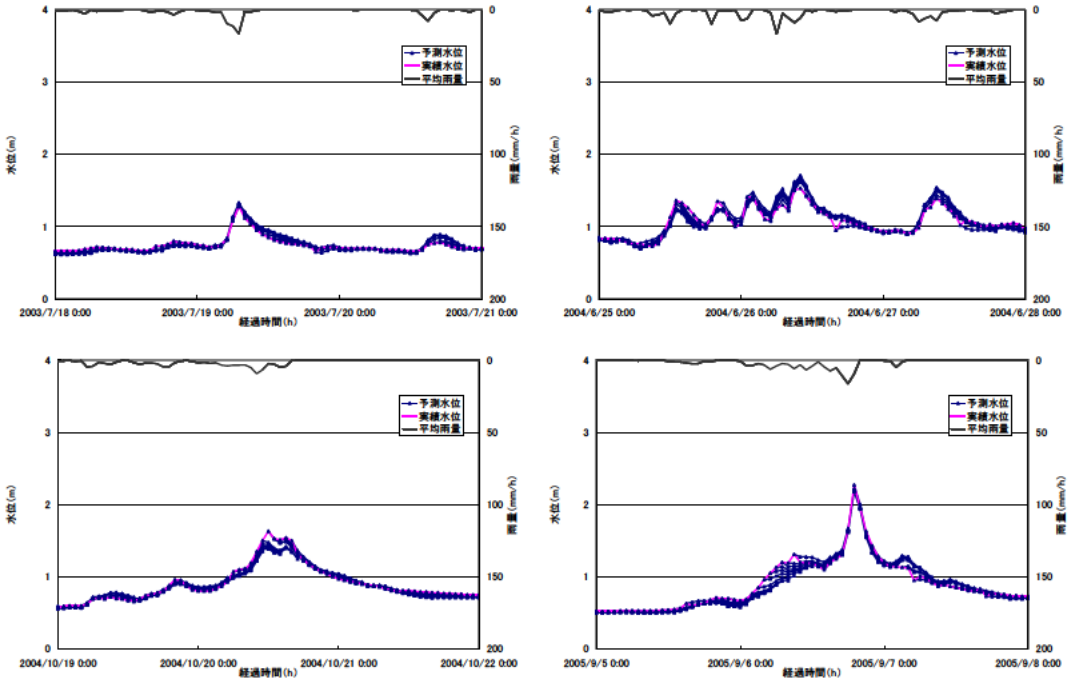


図 3-68　大隈水位　学習トレース結果（メッシュ雨量）

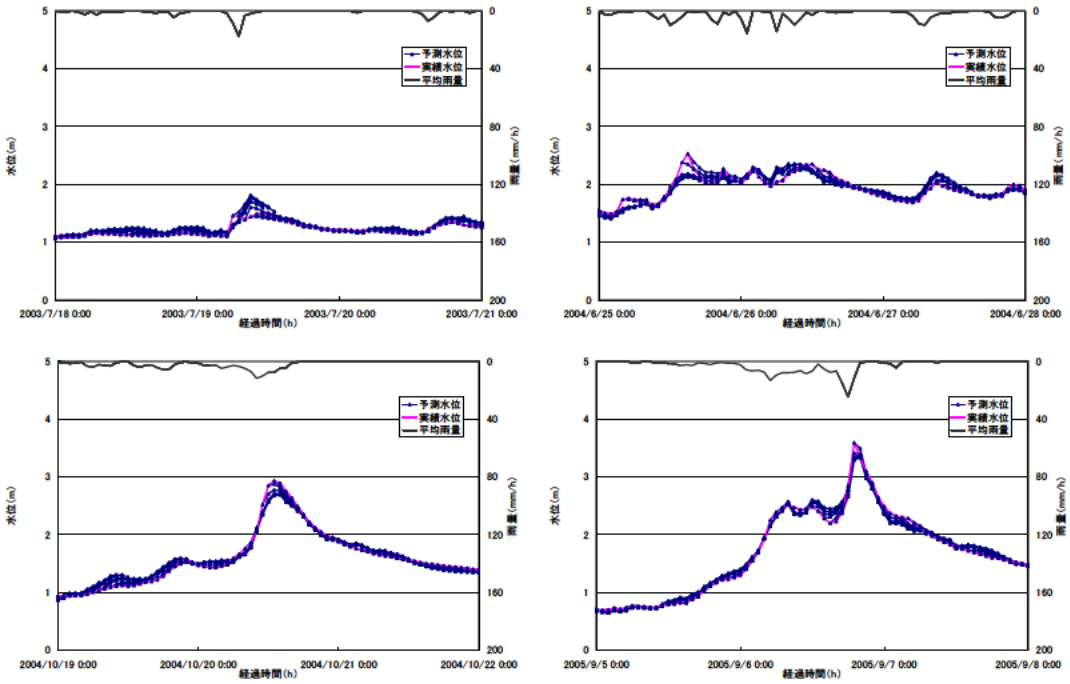


図 3-69　添田水位　学習トレース結果（メッシュ雨量）

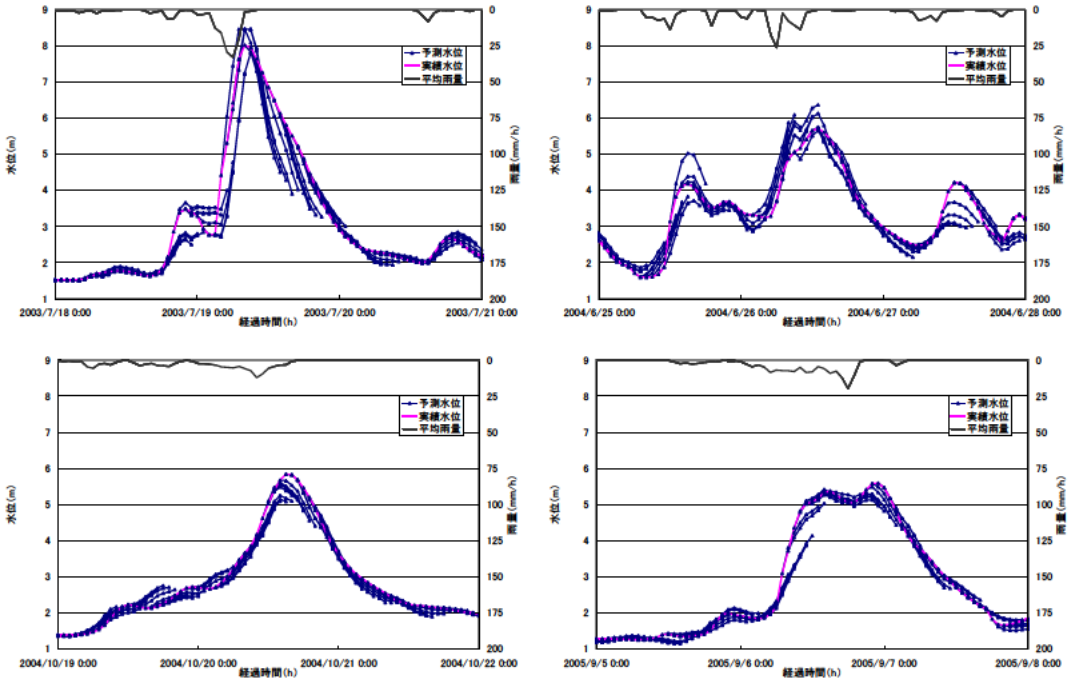


図 3-70　日の出橋水位　学習トレース結果（メッシュ雨量）

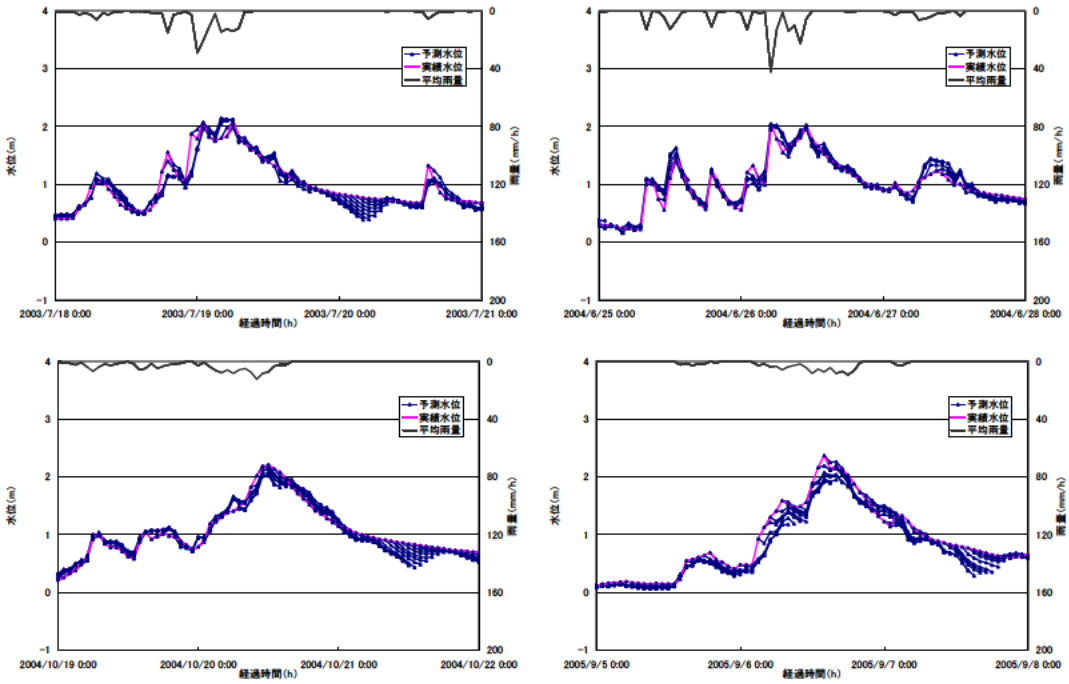


図 3-71　野面水位　学習トレース結果（メッシュ雨量）

3.3.3. 未知データの予測結果

次にモデルにとっては未知となるデータを用いてモデルの予測計算を実施した。各観測所における平均雨量モデルの結果とメッシュ雨量モデルの結果を図 3-72～図 3-91 に示す。

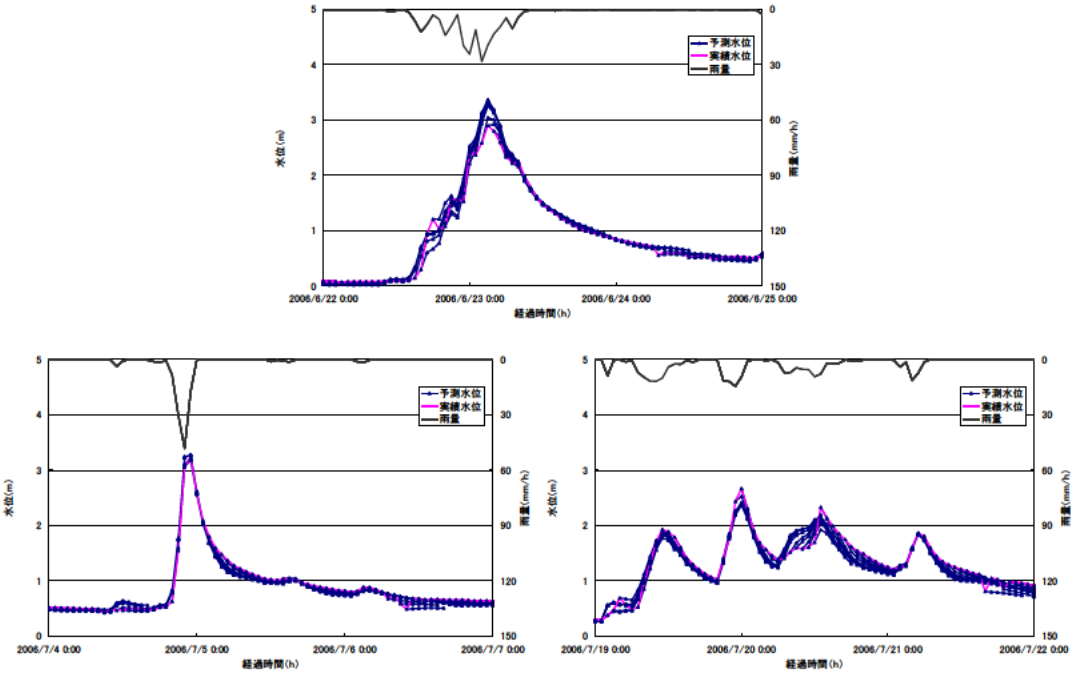


図 3-72　夏吉水位　未知予測結果（平均雨量）

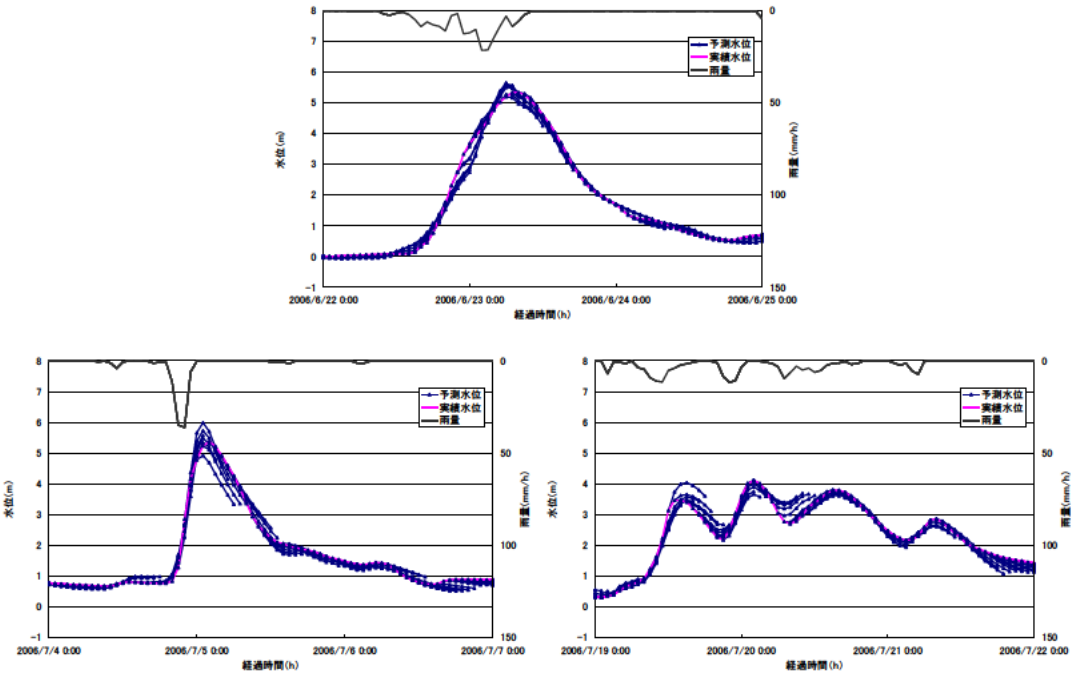


図 3-73　勘六橋水位　未知予測結果（平均雨量）

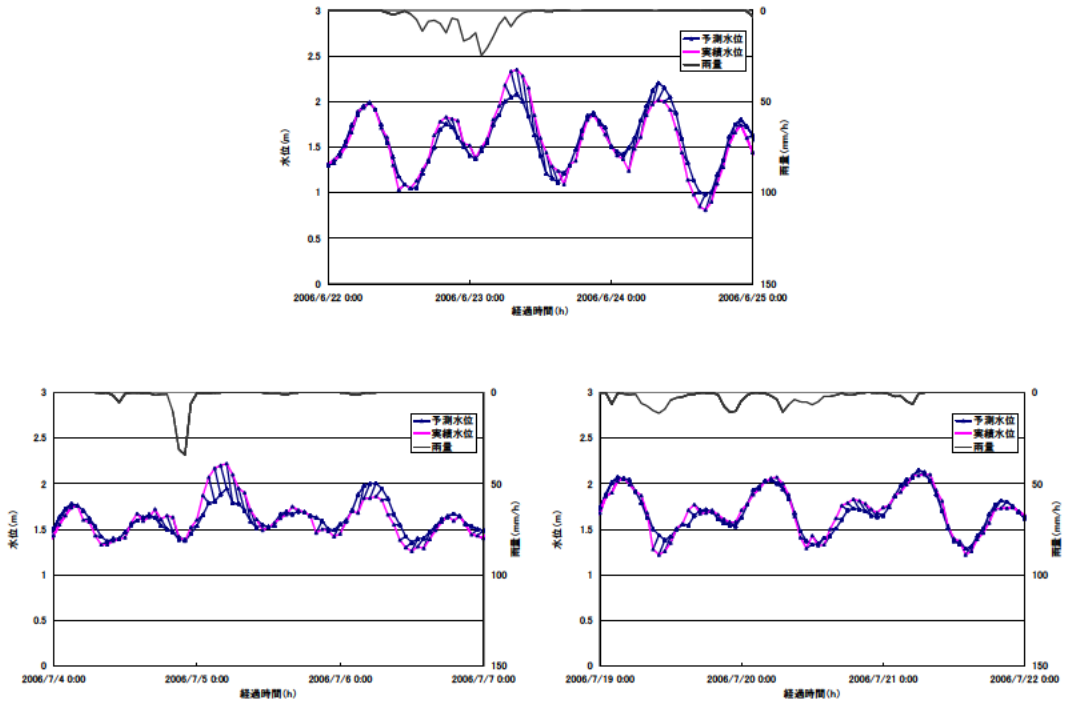


図 3-74　祇園橋水位　未知予測結果（平均雨量）

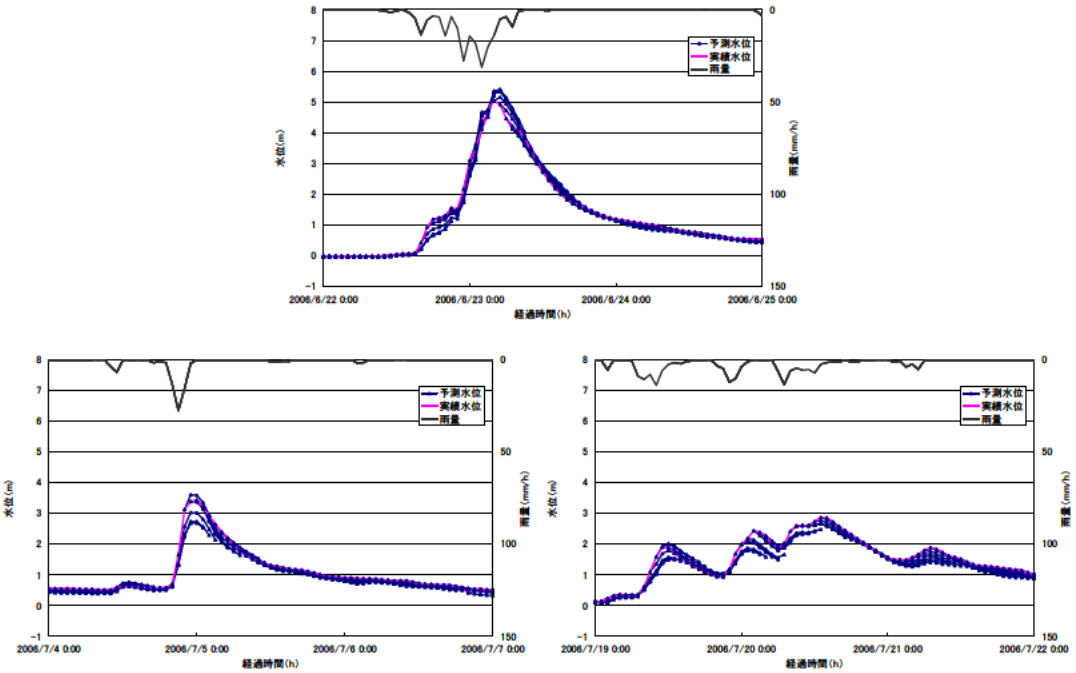


図 3-75　宮田橋水位　未知予測結果（平均雨量）

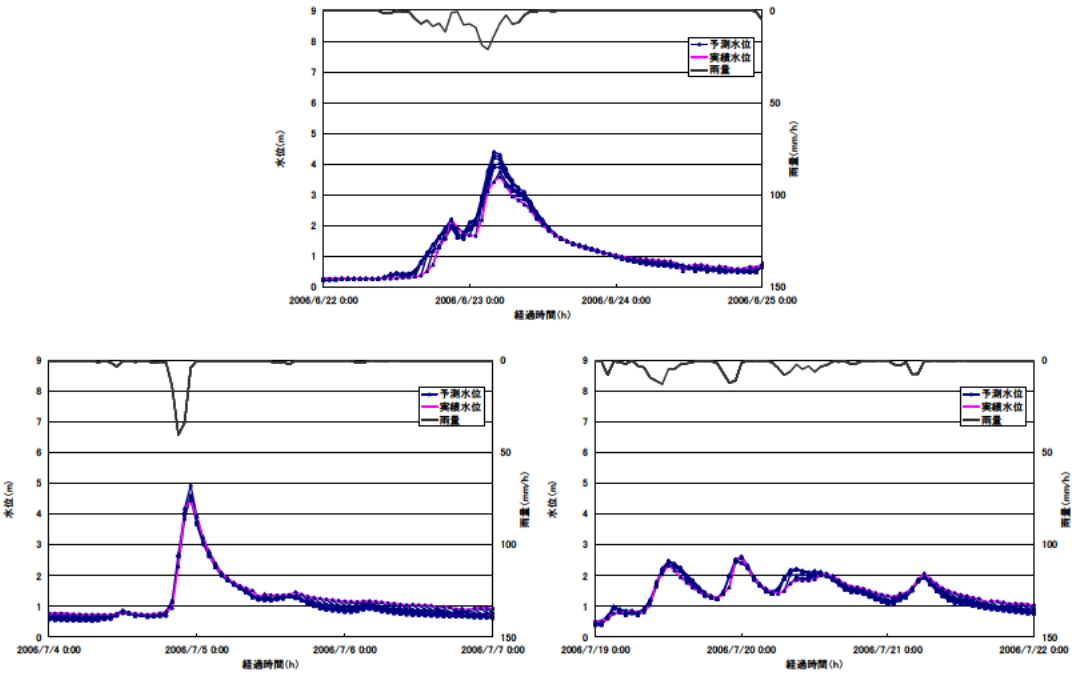


図 3-76　秋松橋水位　未知予測結果（平均雨量）

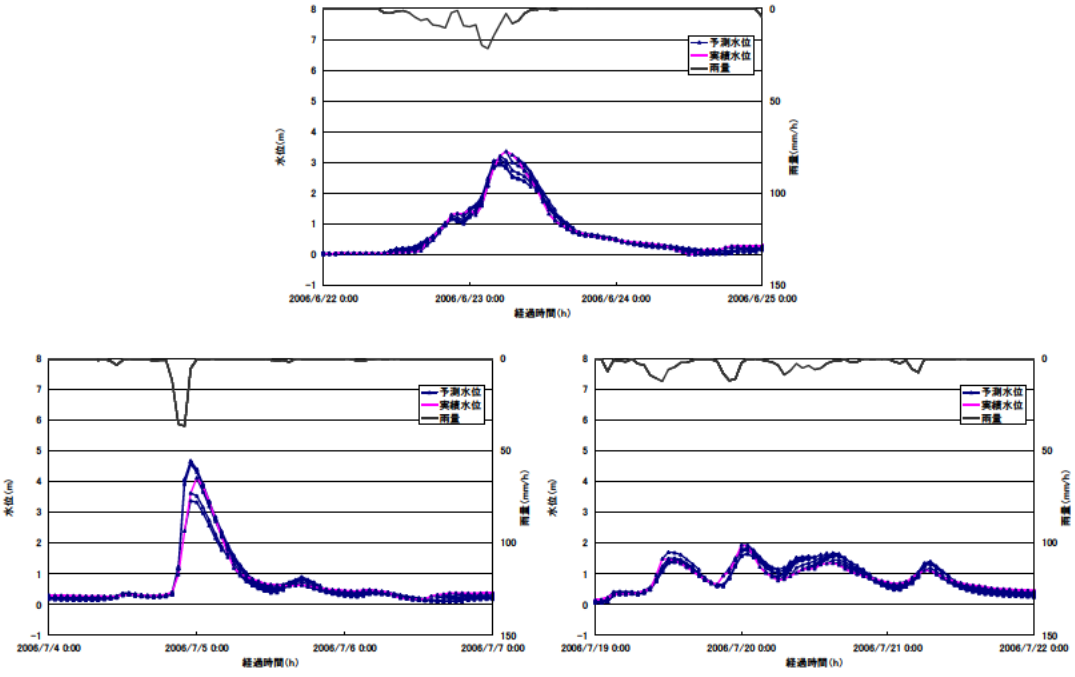


図 3-77　川島水位　未知予測結果（平均雨量）

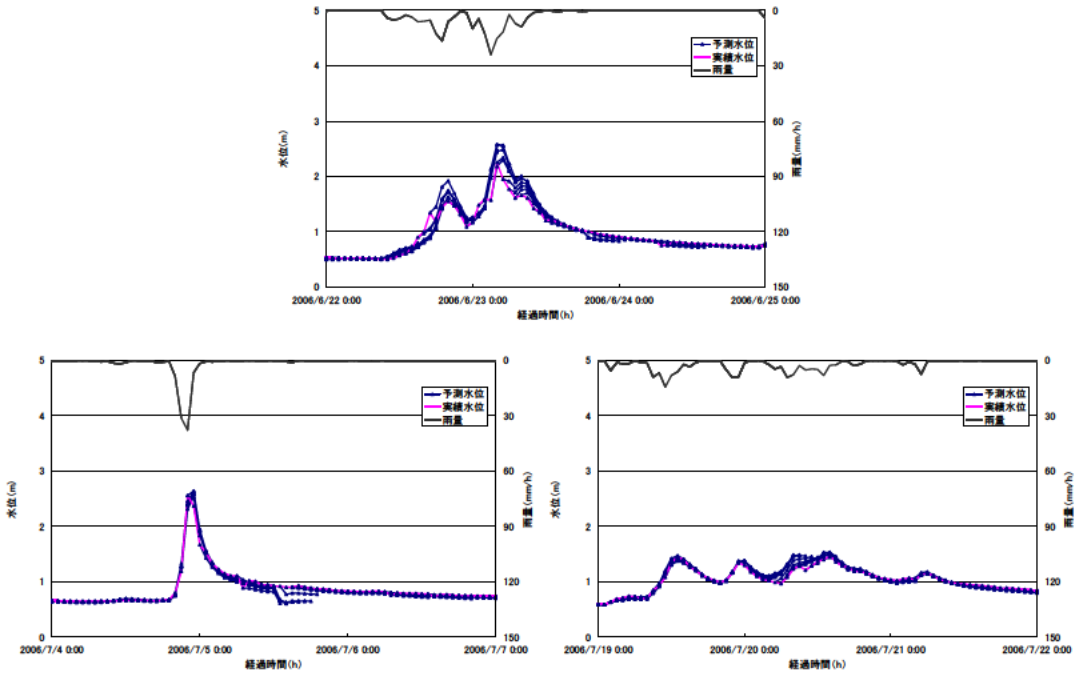


図 3-78　大隈水位　未知予測結果（平均雨量）

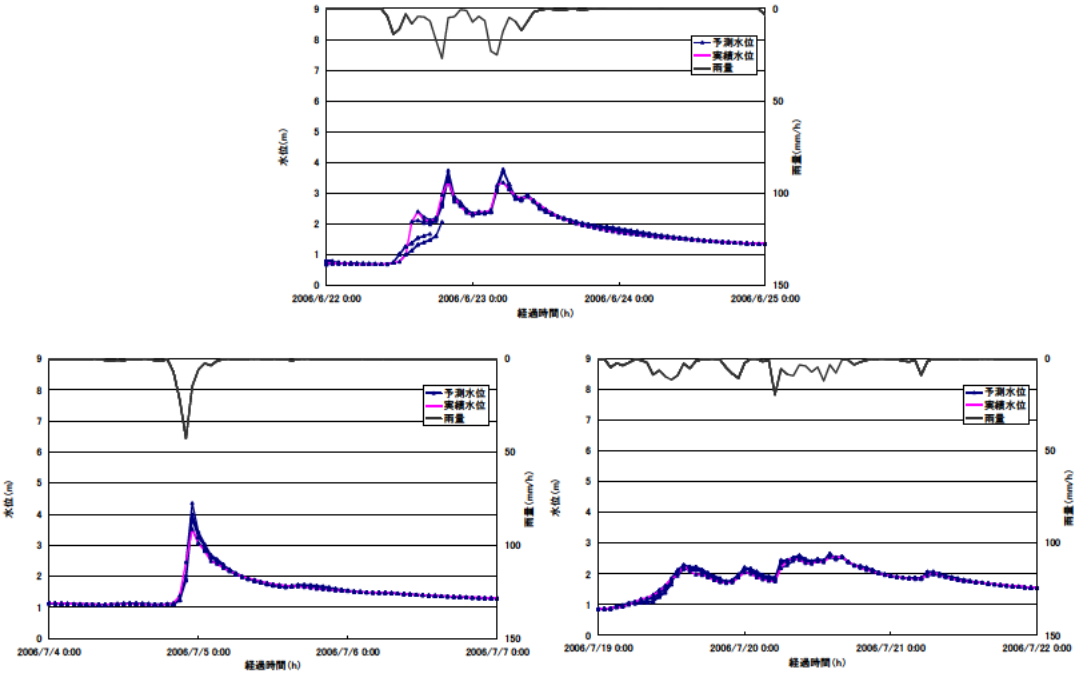


図 3-79　添田水位　未知予測結果（平均雨量）

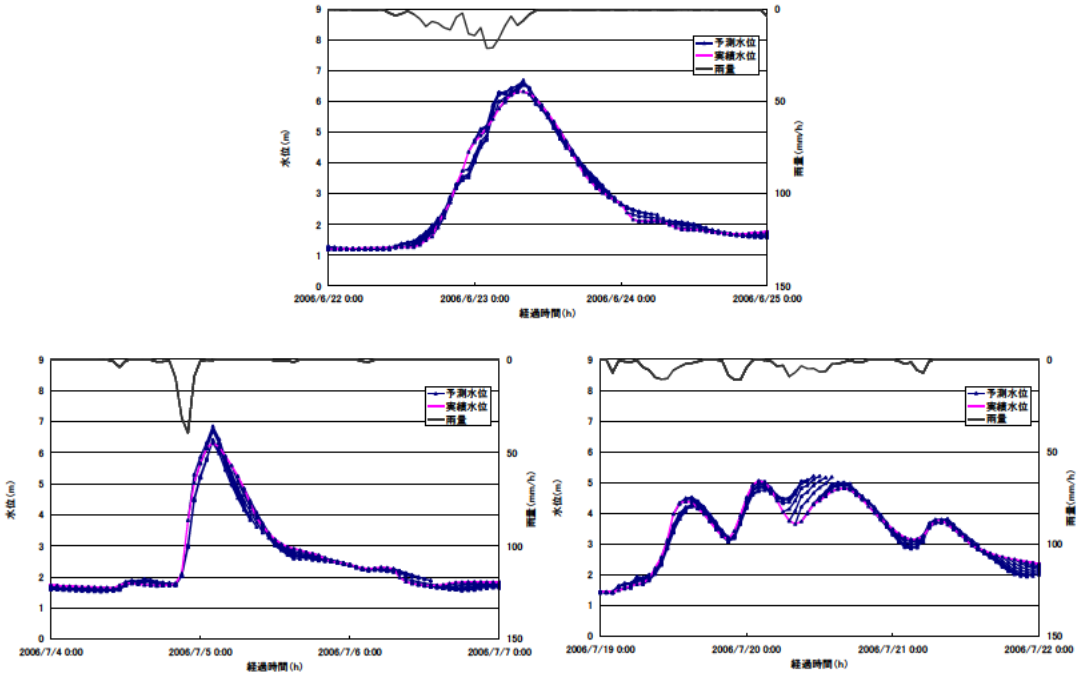


図 3-80　日の出橋水位　未知予測結果（平均雨量）

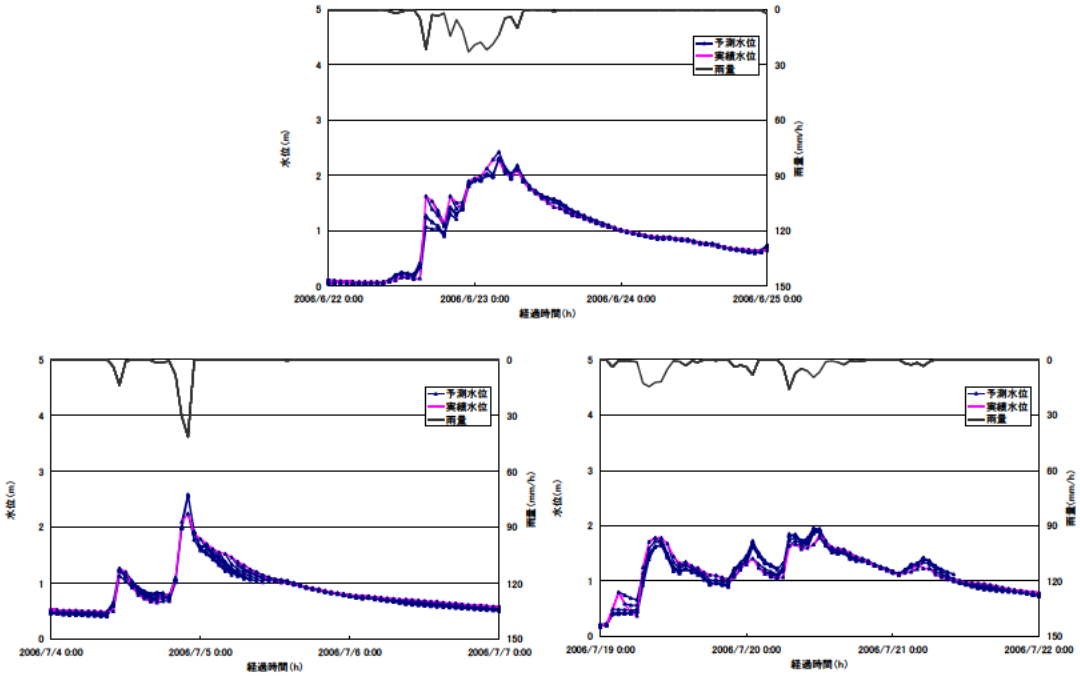


図 3-81　野面水位　未知予測結果（平均雨量）

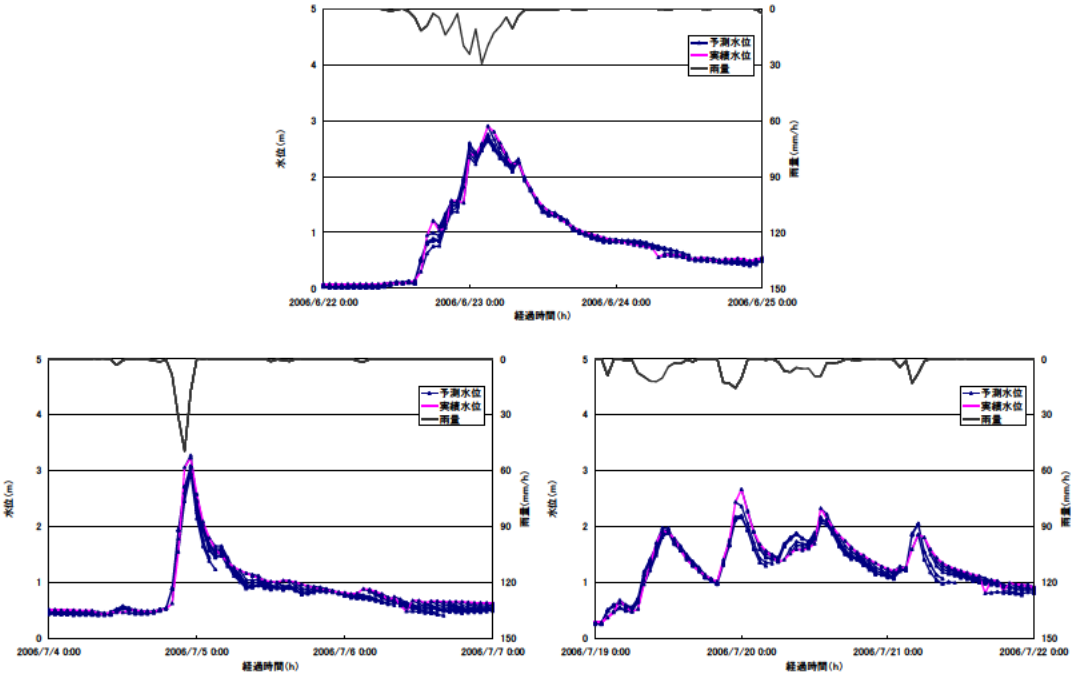


図 3-82　夏吉水位　未知予測結果（メッシュ雨量）

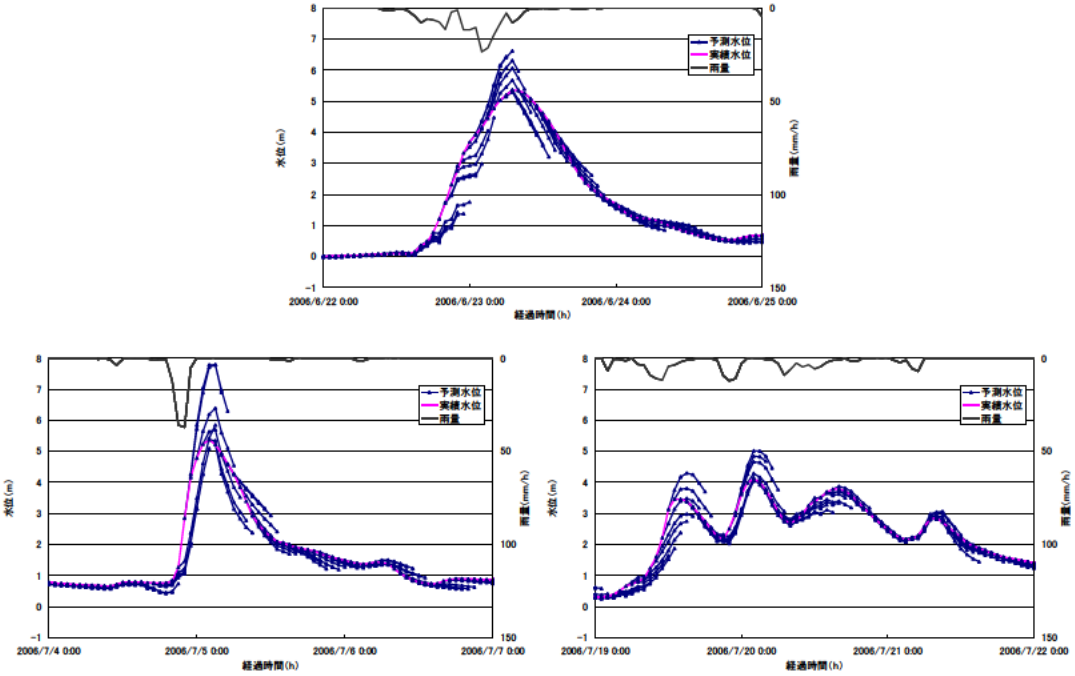


図 3-83　勘六橋水位　未知予測結果（メッシュ雨量）

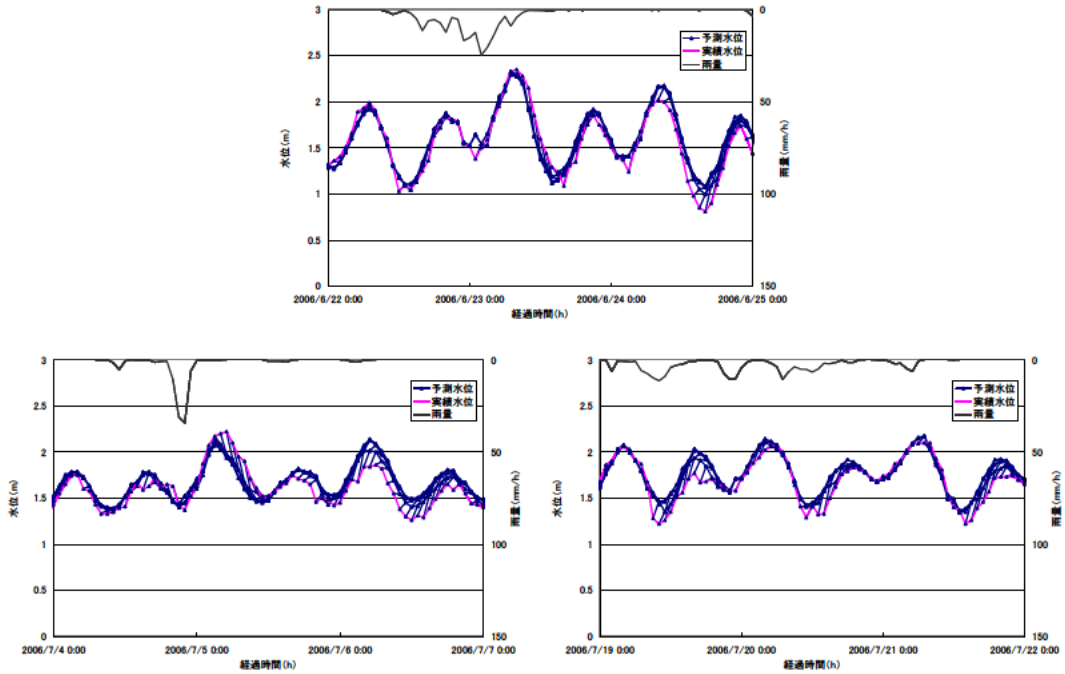


図 3-84　祇園橋水位　未知予測結果（メッシュ雨量）

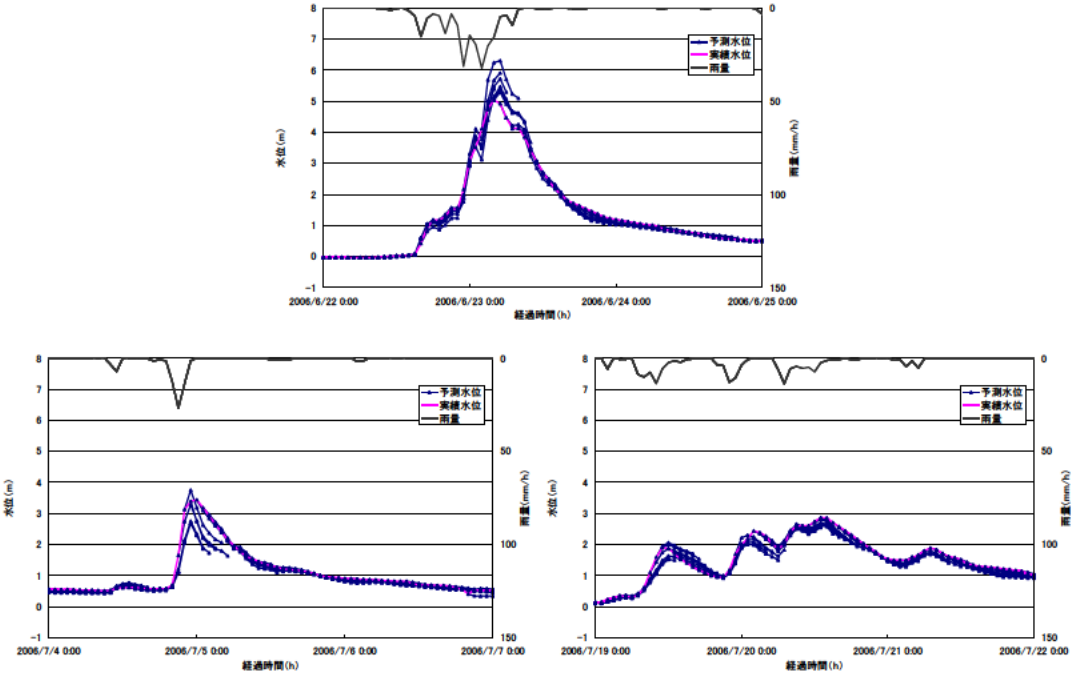


図 3-85　宮田橋水位　未知予測結果（メッシュ雨量）

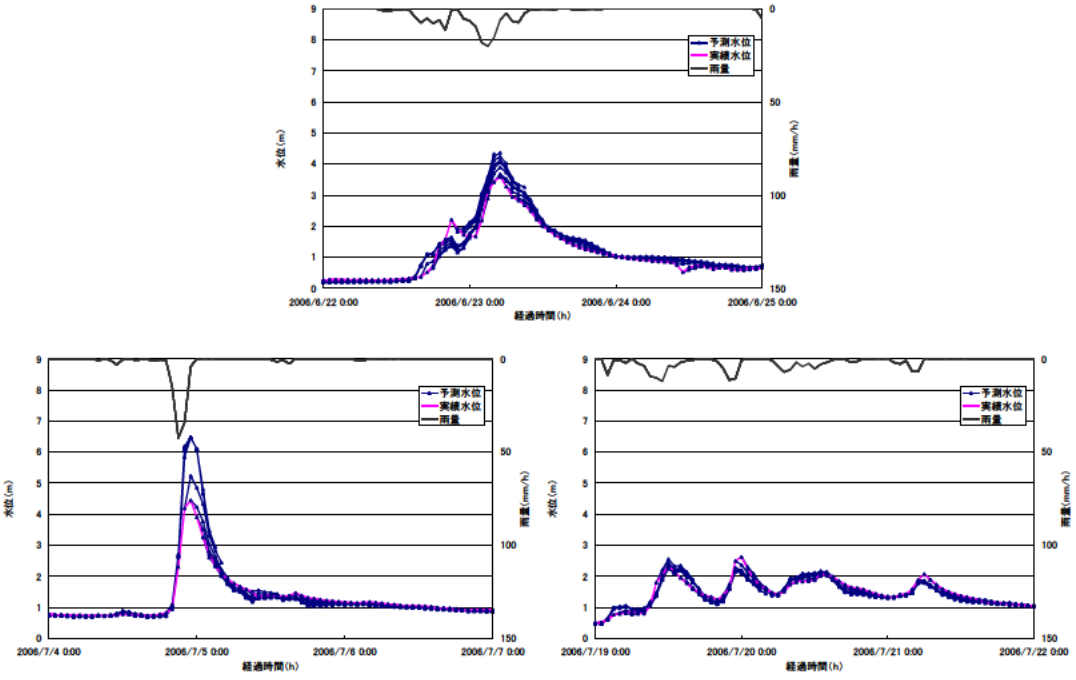


図 3-86　秋松橋水位　未知予測結果（メッシュ雨量）

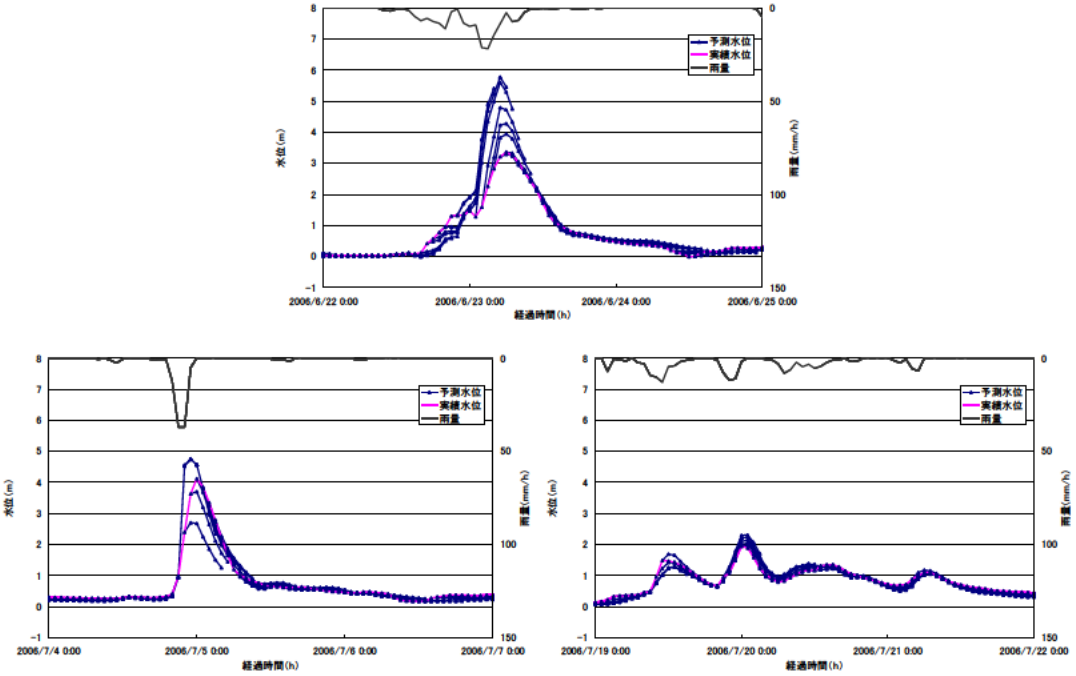


図 3-87　川島水位　未知予測結果（メッシュ雨量）

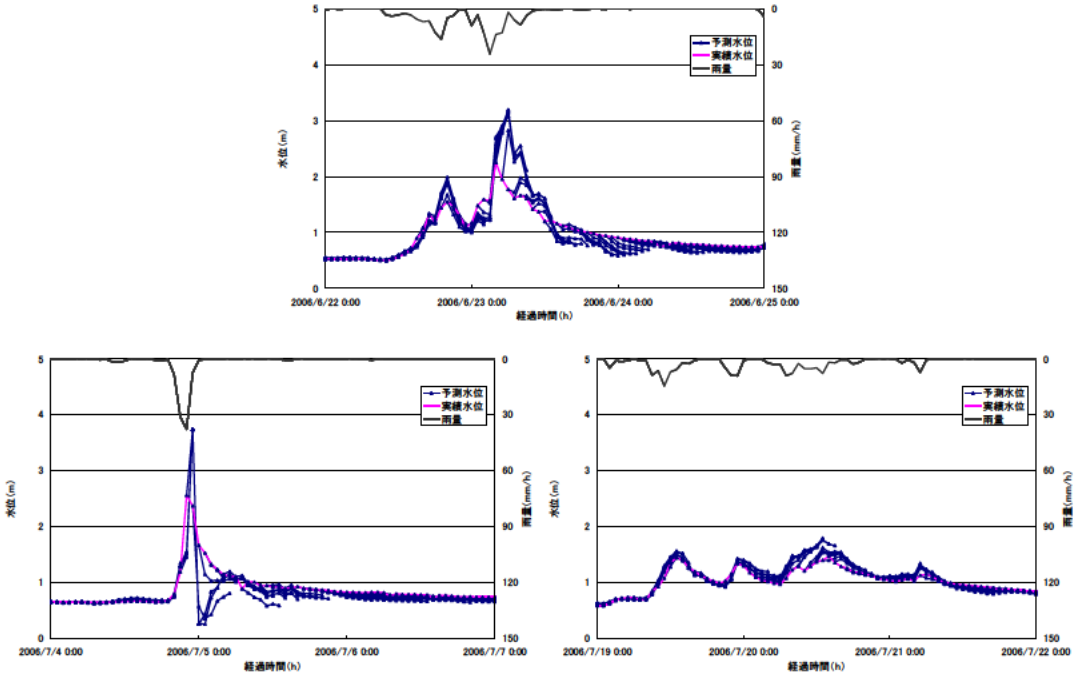


図 3-88　大隈水位　未知予測結果（メッシュ雨量）

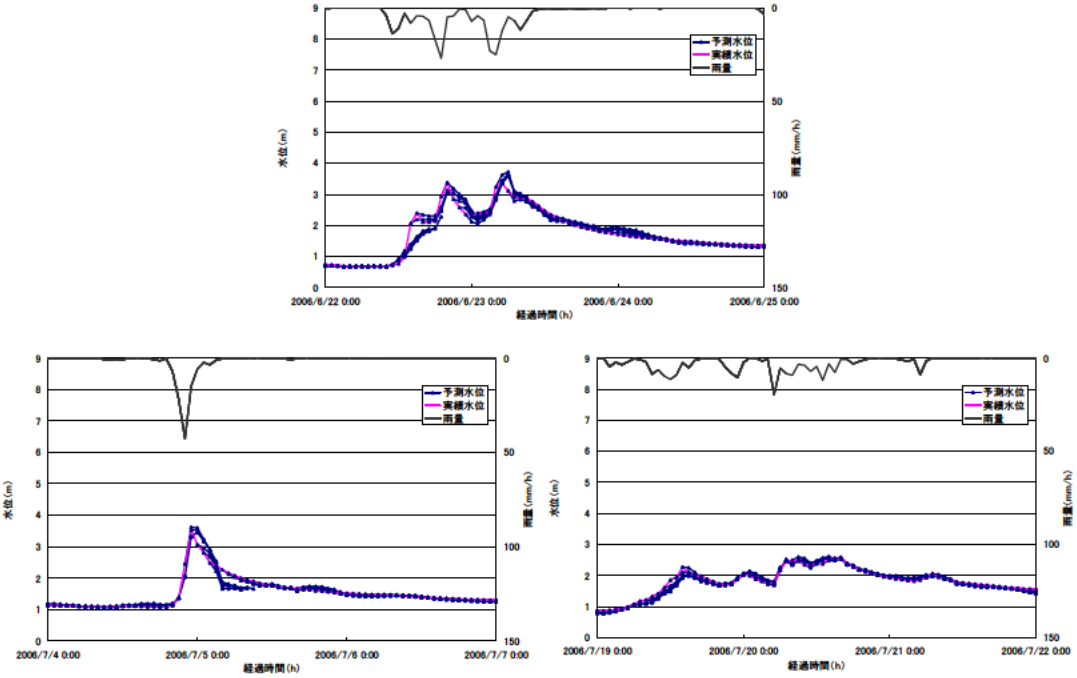


図 3-89　添田水位　未知予測結果（メッシュ雨量）

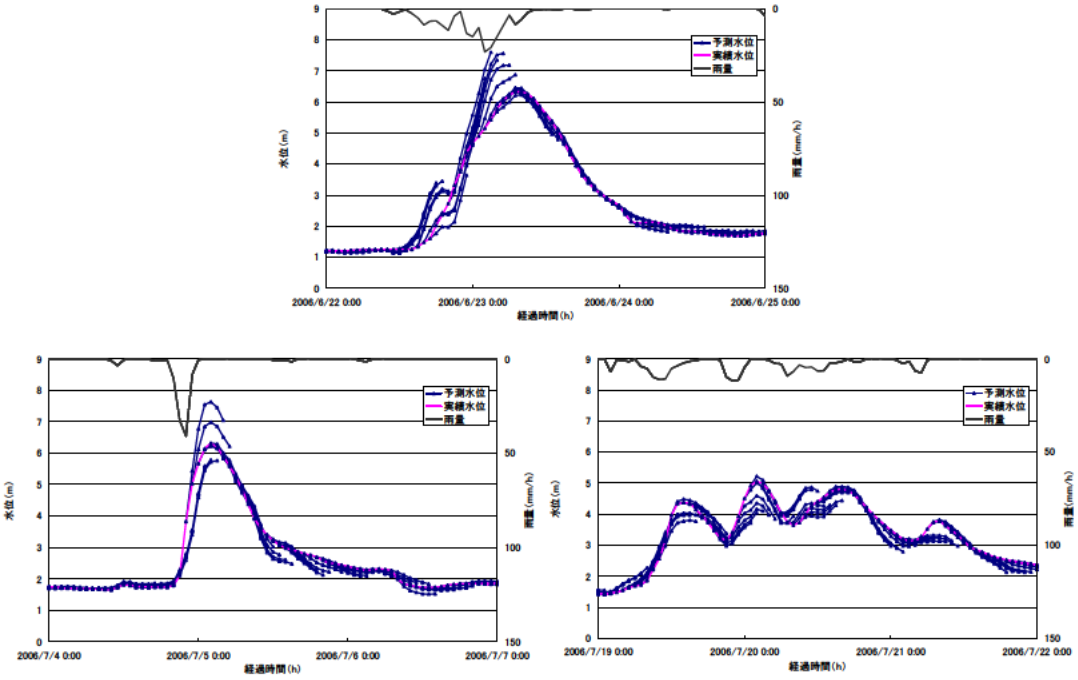


図 3-90　日の出橋水位　未知予測結果（メッシュ雨量）

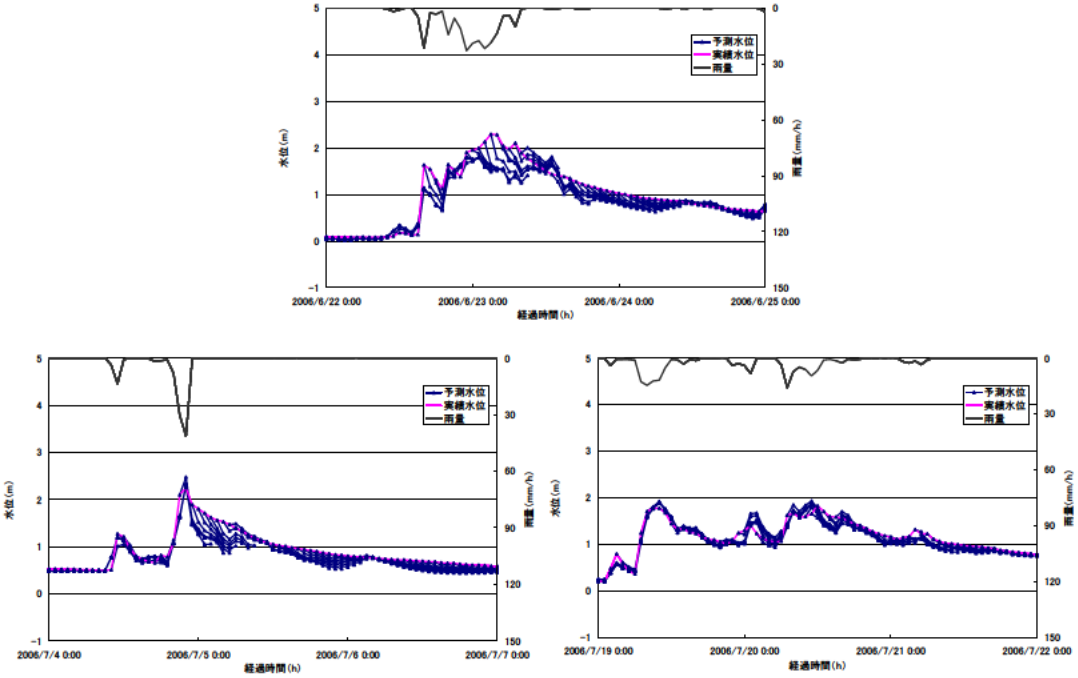


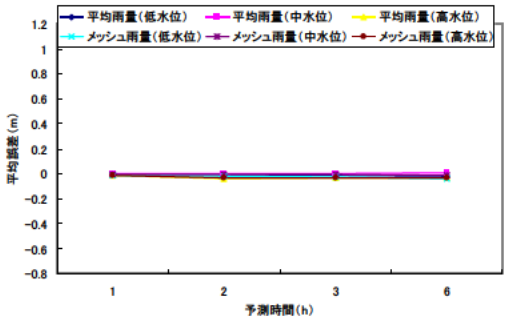
図 3-91　野面水位　未知予測結果（メッシュ雨量）

3.3.4. 水位レベル別精度評価

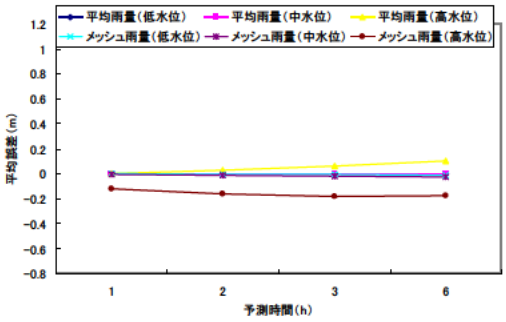
学習トレースと未知データの予測について､それぞれ平均誤差と RMSE を調査した結果を図 3-92～図 3-101 に示す。各グラフは、メッシュ雨量と平均雨量に対する、水位の高さ毎の予測先行時間と予測誤差の関係を示している。水位の高さは、低水位（レベル１）を最低水位から豊水位まで、中水位（レベル２）を豊水位から４番目に大きいピーク水位まで、高水位（レベル３）を４番目に大きいピーク水位から最大水位までの 3 段階に分類した。表 3-22 に水位観測所ごとの水位範囲を示す。

表 3-22　評価対象の水位範囲

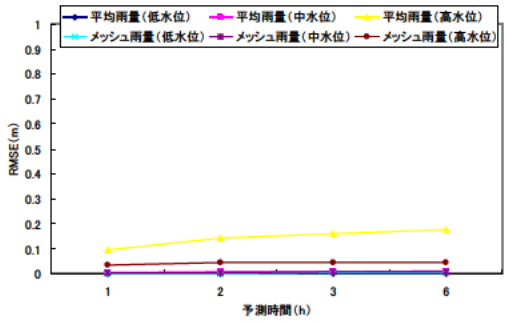
水位観測所	水位レベル	最小値	最大値
夏吉	低水位（レベル１）	—∞	0.29
	中水位（レベル２）	0.29	2.11
	高水位（レベル３）	2.11	∞
勘六橋	低水位（レベル１）	—∞	0.14
	中水位（レベル２）	0.14	3.77
	高水位（レベル３）	3.77	∞
祇園橋	低水位（レベル１）	—∞	1.65
	中水位（レベル２）	1.65	2.41
	高水位（レベル３）	2.41	∞
宮田橋	低水位（レベル１）	—∞	0.05
	中水位（レベル２）	0.05	2.87
	高水位（レベル３）	2.87	∞
秋松橋	低水位（レベル１）	—∞	0.3
	中水位（レベル２）	0.3	3.02
	高水位（レベル３）	3.02	∞
川島	低水位（レベル１）	—∞	0.06
	中水位（レベル２）	0.06	1.94
	高水位（レベル３）	1.94	∞
大隈	低水位（レベル１）	—∞	0.51
	中水位（レベル２）	0.51	1.68
	高水位（レベル３）	1.68	∞
添田	低水位（レベル１）	—∞	0.94
	中水位（レベル２）	0.94	2.85
	高水位（レベル３）	2.85	∞
日の出橋	低水位（レベル１）	—∞	1.27
	中水位（レベル２）	1.27	4.74
	高水位（レベル３）	4.74	∞
野面	低水位（レベル１）	—∞	0.28
	中水位（レベル２）	0.28	1.88
	高水位（レベル３）	1.88	∞



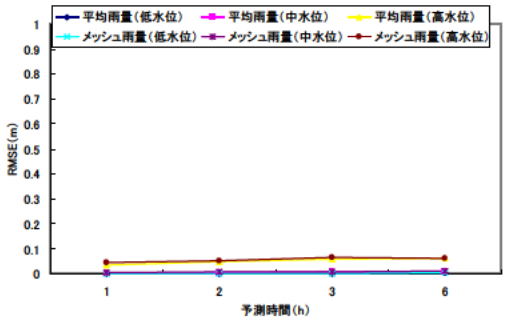
（a）学習トレースの平均誤差



（b）未知予測の平均誤差

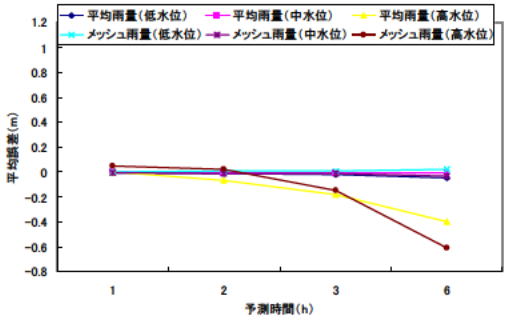


（c）学習トレースの RMSE

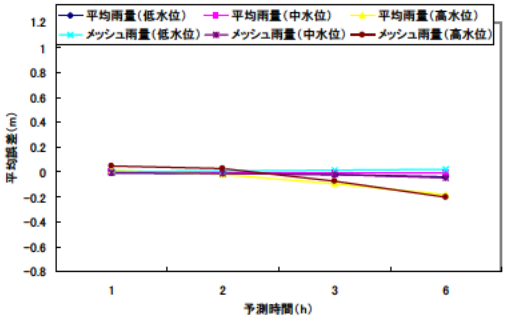


（d）未知予測の RMSE

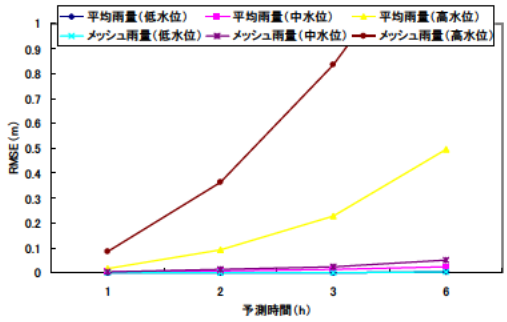
図 3-92　夏吉水位　雨量別・予測時間別の精度評価



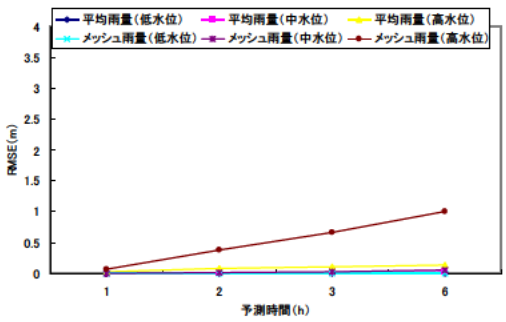
（a）学習トレースの平均誤差



（b）未知予測の平均誤差

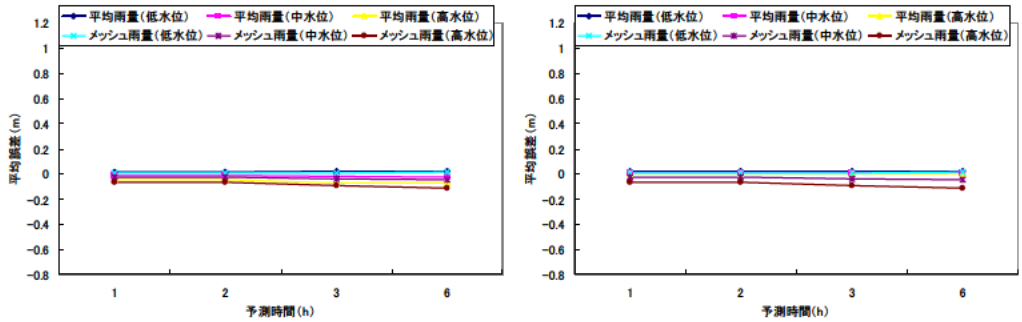


（c）学習トレースの RMSE

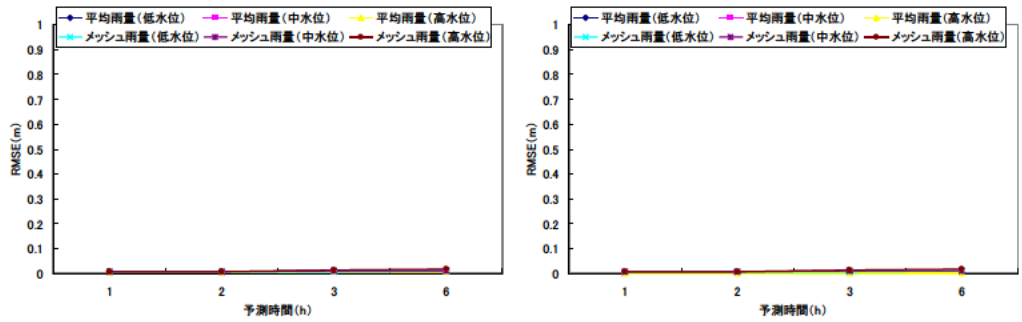


（d）未知予測の RMSE

図 3-93　勘六橋水位　雨量別・予測時間別の精度評価

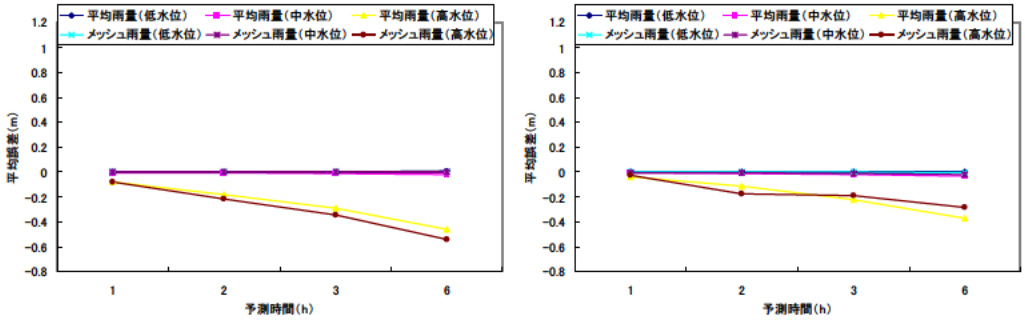


（a）学習トレースの平均誤差　　（b）未知予測の平均誤差

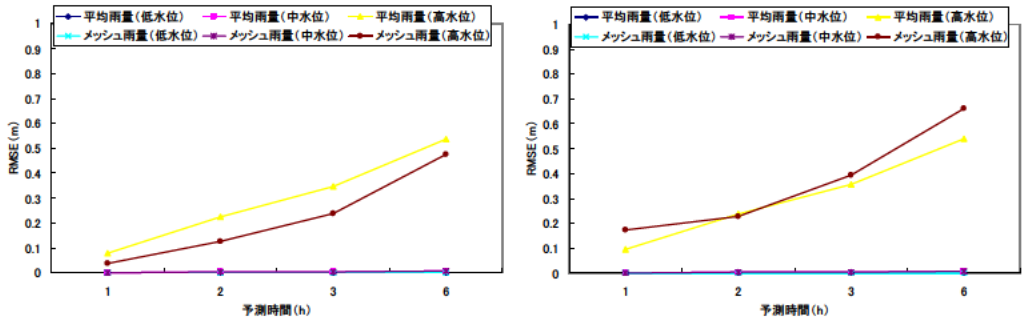


（c）学習トレースの RMSE　　（d）未知予測の RMSE

図 3-94　祇園橋水位　雨量別・予測時間別の精度評価

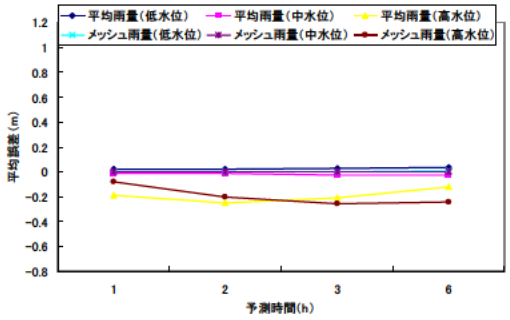


（a）学習トレースの平均誤差　　（b）未知予測の平均誤差

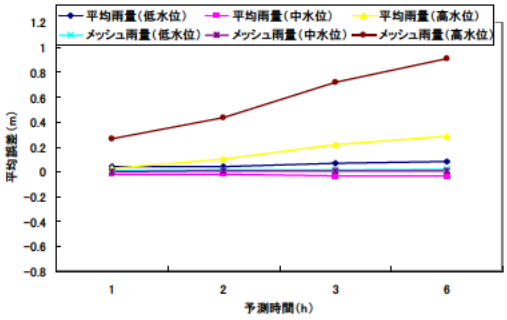


（c）学習トレースの RMSE　　（d）未知予測の RMSE

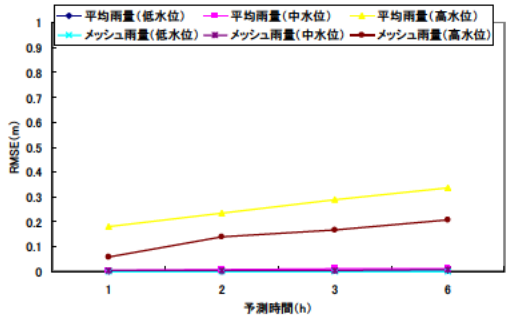
図 3-95　宮田橋水位　雨量別･予測時間別の精度評価



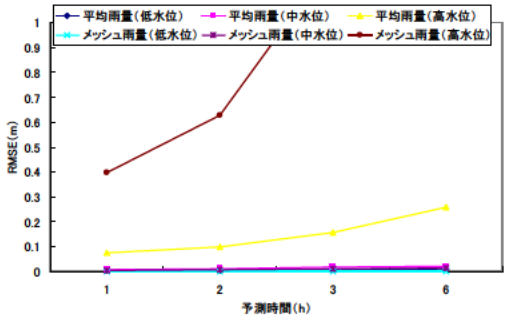
（a）学習トレースの平均誤差



（b）未知予測の平均誤差

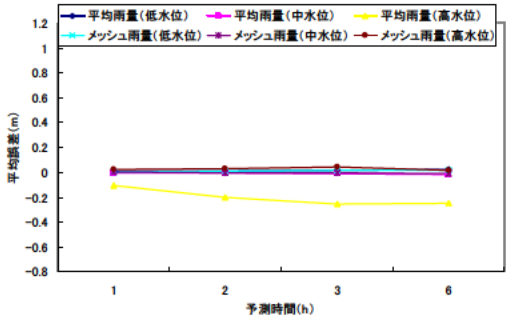


（c）学習トレースの RMSE

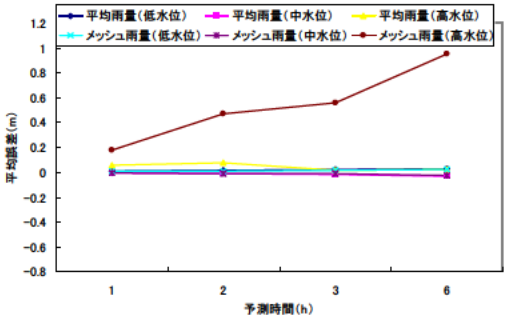


（d）未知予測の RMSE

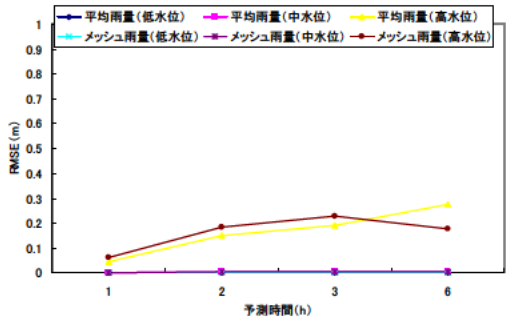
図 3-96　秋松橋水位　雨量別・予測時間別の精度評価



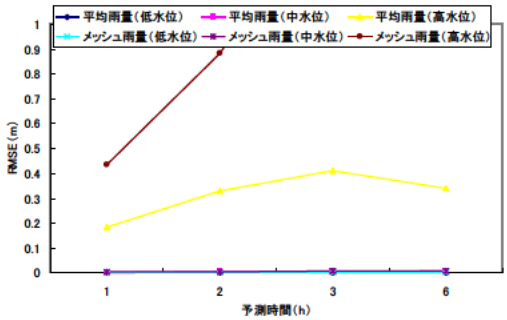
（a）学習トレースの平均誤差



（b）未知予測の平均誤差

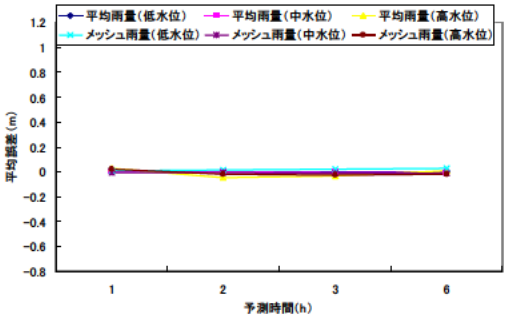


（c）学習トレースの RMSE

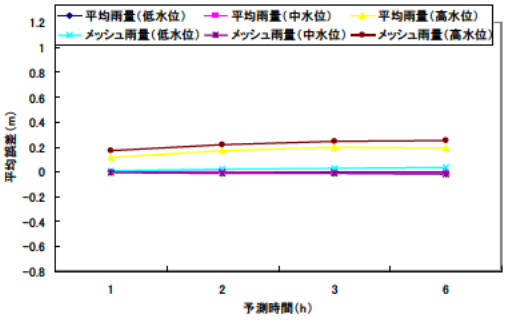


（d）未知予測の RMSE

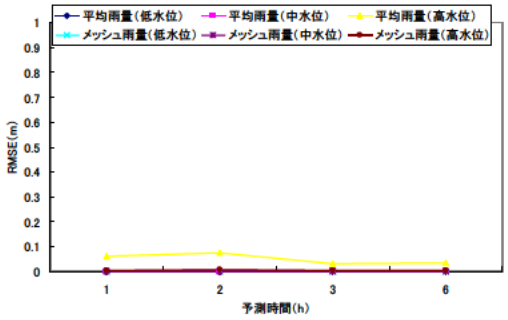
図 3-97　川島水位　雨量別・予測時間別の精度評価



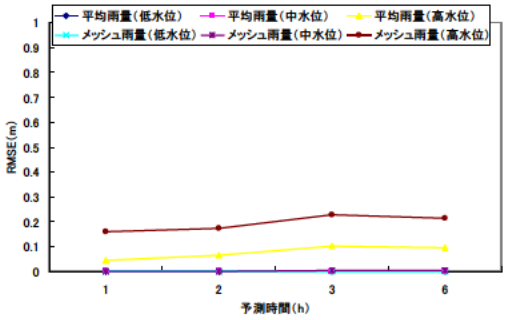
（a）学習トレースの平均誤差



（b）未知予測の平均誤差

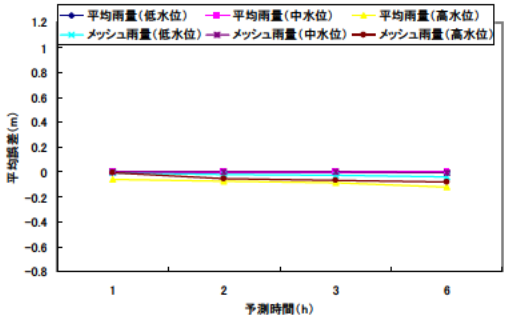


（c）学習トレースの RMSE

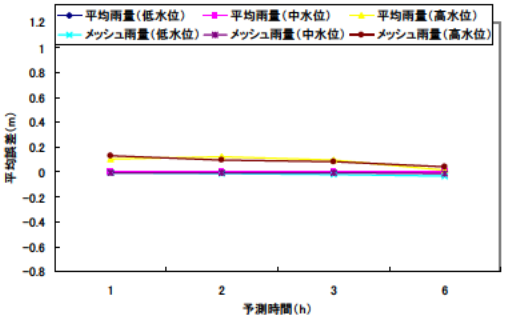


（d）未知予測の RMSE

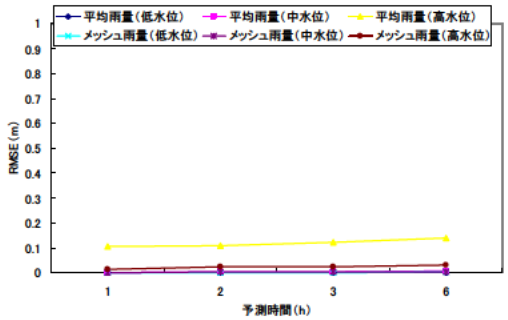
図 3-98　大隈水位　雨量別・予測時間別の精度評価



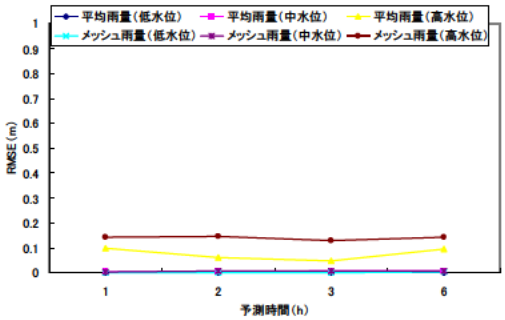
（a）学習トレースの平均誤差



（b）未知予測の平均誤差

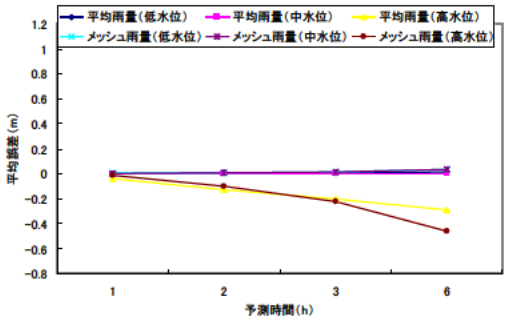


（c）学習トレースの RMSE

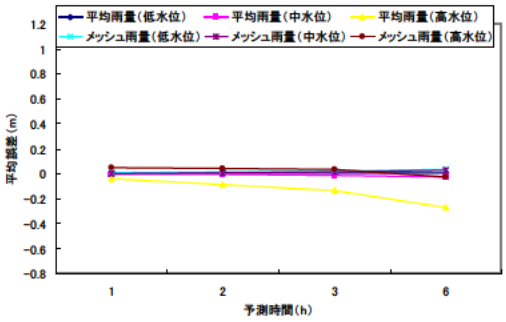


（d）未知予測の RMSE

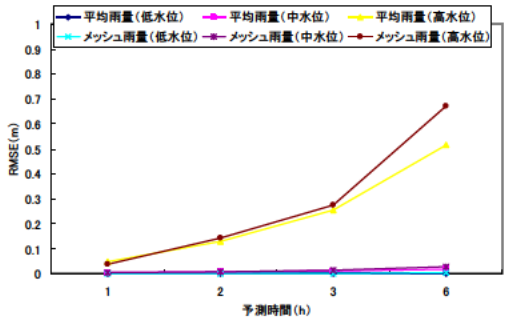
図 3-99　添田水位　雨量別・予測時間別の精度評価



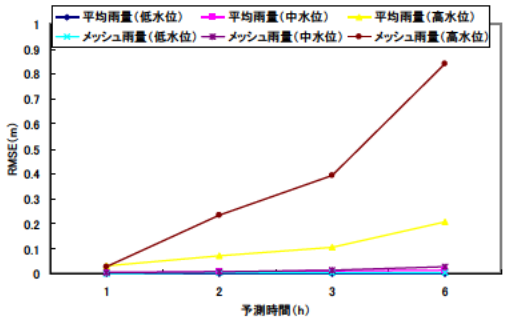
（a）学習トレースの平均誤差



（b）未知予測の平均誤差

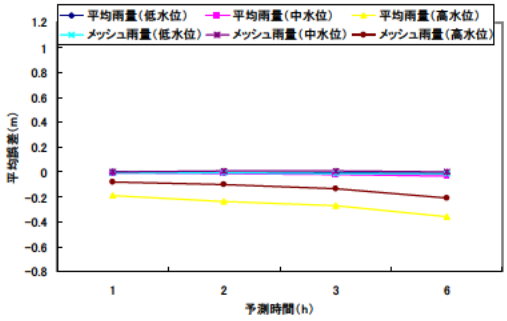


（c）学習トレースの RMSE

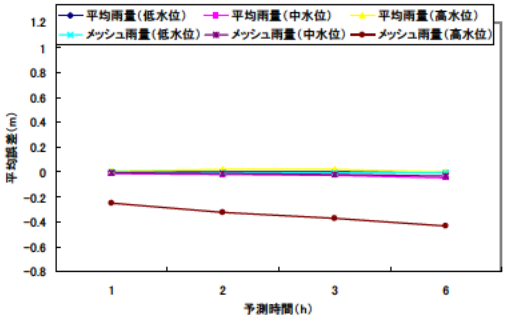


（d）未知予測の RMSE

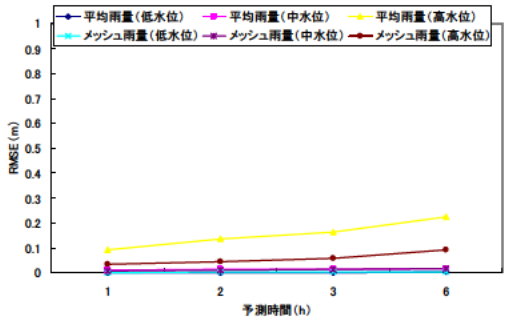
図 3-100　日の出橋水位　雨量別・予測時間別の精度評価



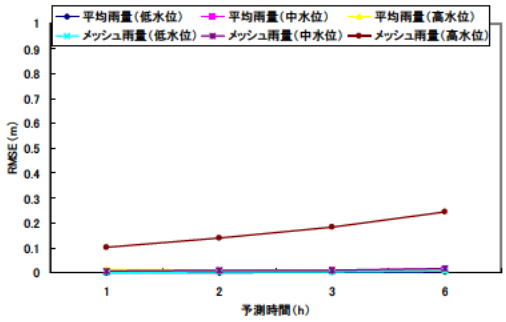
（a）学習トレースの平均誤差



（b）未知予測の平均誤差



（c）学習トレースの RMSE



（d）未知予測の RMSE

図 3-101　野面水位　雨量別・予測時間別の精度評価

図 3-92～図 3-101 を基に、6 時間先予測を対象としてメッシュ雨量よりも平均雨量の RMSE が小さくなるケースを表 3-23 にまとめた。学習トレースでは平均雨量を用いた方が RMSE が小さくなる割合が少ないが、未知データの予測では逆に平均雨量を用いた方が RMSE が小さくなる割合が多いことが分かる。また、中水位と高水位に着目すると、学習トレースではメッシュ雨量の方が誤差が小さくなるケースが多いが、未知予測では平均雨量の方が誤差が小さくなるケースが多いことがわかる。これは平均雨量モデルのほうが未知予測に対する予測安定性が高いことを示している。

表 3-23　メッシュ雨量よりも平均雨量の RMSE が小さくなるケース

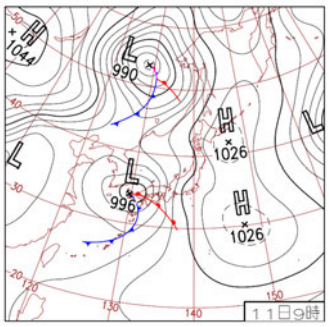
	学習トレース				未知予測			
	全体	低水位	中水位	高水位	全体	低水位	中水位	高水位
野面	○	○			○	○	○	○
添田	○	○			○	○		○
夏吉	○	○			○	○	○	
大隈	○	○	○		○	○	○	○
秋松橋								○
宮田橋						○		○
川島					○			○
勘六橋	○		○	○	○		○	○
日の出橋	○	○	○	○	○	○	○	○
祇園橋	○		○	○	○	○	○	○
計	7 (70%)	5 (50%)	4 (40%)	3 (30%)	8 (80%)	7 (70%)	6 (60%)	9 (90%)

3.3.5. 出水ピーク・立上り・立下り精度評価

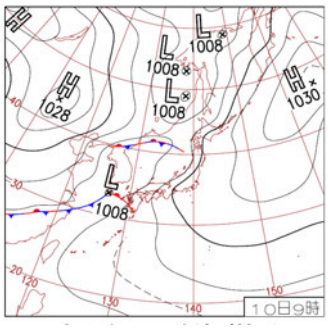
未知データの中で規模の大きな出水１０イベントを抽出し、水位ピーク誤差の精度評価を行った。評価対象とした出水ピークの日時を表 3-24 に示し、天気図を図 3-102 に示す。イベント No.はピーク水位の大きい順に割り当てている。

表 3-24　各水位観測所の出水ピーク日時

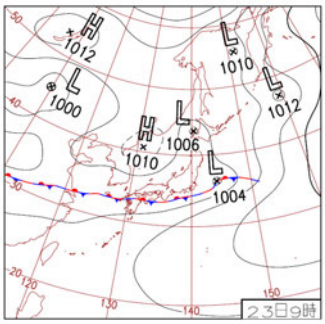
	夏吉	気象概況	勘六橋	気象概況	宮田橋	気象概況
No.1	2006/7/4 23:00	梅雨前線	2006/7/5 2:00	梅雨前線	2006/6/23 4:00	梅雨前線
No.2	2006/6/23 3:00	梅雨前線	2006/6/23 8:00	梅雨前線	2006/6/26 5:00	梅雨前線
No.3	2006/7/20 0:00	梅雨前線	2006/8/18 15:00	台風第 10 号	2006/7/5 0:00	梅雨前線
No.4	2006/7/2 4:00	梅雨前線	2006/7/2 6:00	梅雨前線	2006/7/20 13:00	梅雨前線
No.5	2006/8/31 19:00	秋雨前線	2006/6/30 22:00	梅雨前線	2006/8/31 22:00	秋雨前線
No.6	2006/8/18 13:00	台風第 10 号	2006/8/30 15:00	秋雨前線	2006/4/11 7:00	低気圧/前線
No.7	2006/8/11 17:00	寒気/雷雨	2006/4/11 4:00	低気圧/前線	2006/8/18 22:00	台風第 10 号
No.8	2006/4/11 1:00	低気圧/前線	2006/9/17 21:00	台風第 13 号	2006/7/2 4:00	梅雨前線
No.9	2006/9/17 16:00	台風第 13 号	2006/8/11 20:00	寒気/雷雨	2006/6/30 20:00	梅雨前線
No.10	2006/6/27 22:00	梅雨前線	2006/7/17 14:00	梅雨前線	2006/9/18 4:00	温帯低気圧
	秋松橋	気象概況	川島	気象概況	大隈	気象概況
No.1	2006/7/4 23:00	梅雨前線	2006/7/5 0:00	梅雨前線	2006/7/4 22:00	梅雨前線
No.2	2006/6/23 5:00	梅雨前線	2006/6/23 6:00	梅雨前線	2006/6/23 4:00	梅雨前線
No.3	2006/7/2 4:00	梅雨前線	2006/7/20 0:00	梅雨前線	2006/8/18 11:00	台風第 10 号
No.4	2006/8/18 12:00	台風第 10 号	2006/8/18 13:00	台風第 10 号	2006/8/30 11:00	秋雨前線
No.5	2006/7/20 0:00	梅雨前線	2006/7/2 5:00	梅雨前線	2006/7/20 14:00	梅雨前線
No.6	2006/6/30 19:00	梅雨前線	2006/6/30 20:00	梅雨前線	2006/7/8 5:00	梅雨前線
No.7	2006/4/11 2:00	低気圧/前線	2006/8/30 13:00	秋雨前線	2006/7/25 18:00	梅雨前線
No.8	2006/9/17 17:00	台風第 13 号	2006/4/11 7:00	低気圧/前線	2006/7/2 4:00	梅雨前線
No.9	2006/8/31 20:00	秋雨前線	2006/9/17 18:00	台風第 13 号	2006/9/9 19:00	秋雨前線
No.10	2006/8/11 15:00	寒気/雷雨	2006/8/11 17:00	寒気/雷雨	2006/4/10 1:00	低気圧/前線
	添田	気象概況	日の出橋	気象概況	野面	気象概況
No.1	2006/8/30 11:00	秋雨前線	2006/6/23 8:00	梅雨前線	2006/6/23 4:00	梅雨前線
No.2	2006/7/4 23:00	梅雨前線	2006/7/5 2:00	梅雨前線	2006/7/4 22:00	梅雨前線
No.3	2006/6/22 20:00	梅雨前線	2006/7/20 2:00	梅雨前線	2006/7/2 3:00	梅雨前線
No.4	2006/8/18 12:00	台風第 10 号	2006/8/18 15:00	台風第 10 号	2006/7/20 12:00	梅雨前線
No.5	2006/7/20 16:00	梅雨前線	2006/7/2 6:00	梅雨前線	2006/8/31 21:00	秋雨前線
No.6	2006/7/25 11:00	梅雨前線	2006/8/30 15:00	秋雨前線	2006/8/18 14:00	台風第 10 号
No.7	2006/7/2 5:00	梅雨前線	2006/6/30 22:00	梅雨前線	2006/8/26 17:00	にわか雨/雷雨
No.8	2006/9/16 14:00	秋雨前線	2006/4/11 4:00	低気圧/前線	2006/6/30 19:00	梅雨前線
No.9	2006/5/10 19:00	低気圧//前線	2006/8/11 20:00	寒気/雷雨	2006/9/17 16:00	台風第 13 号
No.10	2006/4/11 7:00	低気圧/前線	2006/9/17 20:00	台風第 13 号	2006/4/11 6:00	低気圧/前線



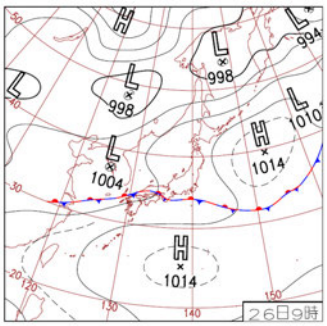
2006/4/11



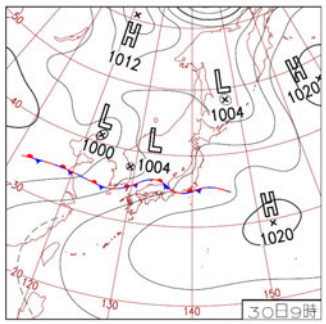
2006/5/10



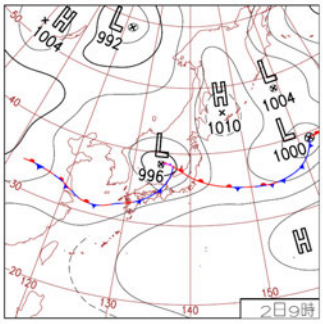
2006/6/23



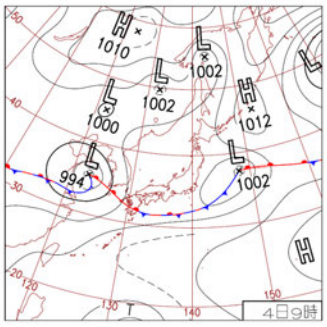
2006/6/26



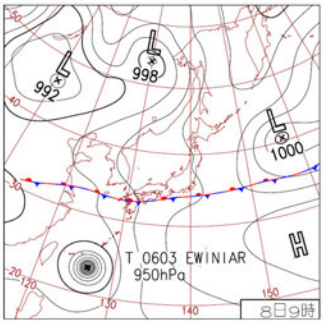
2006/6/30



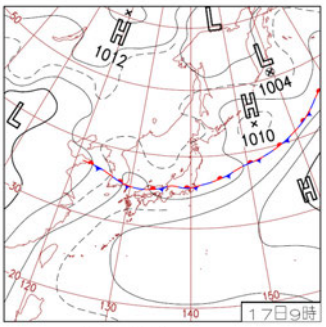
2006/7/2



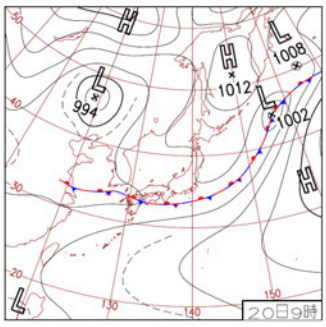
2006/7/4



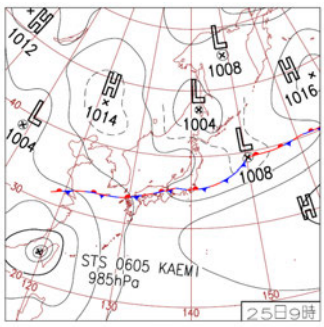
2006/7/8



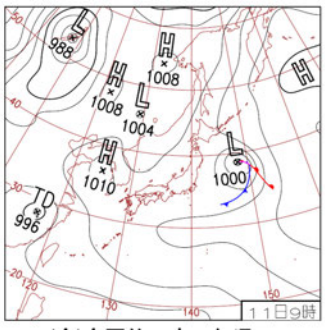
2006/7/17



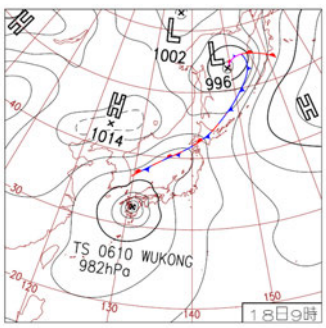
2006/7/20



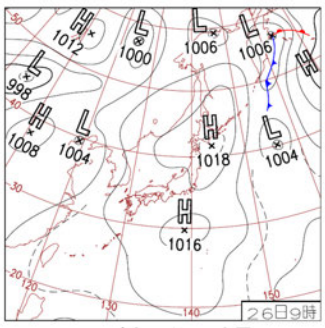
2006/7/25



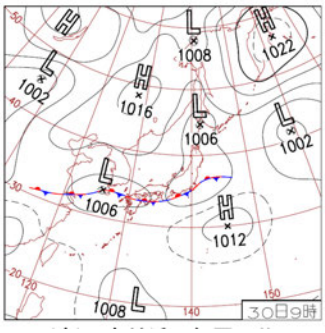
2006/8/11



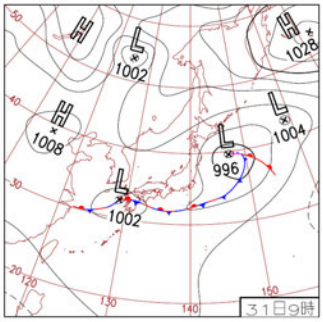
2006/8/18



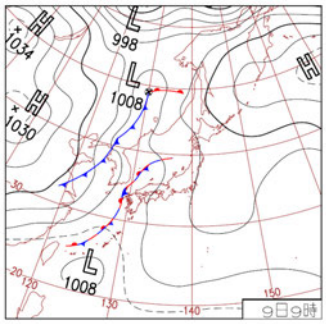
2006/8/26



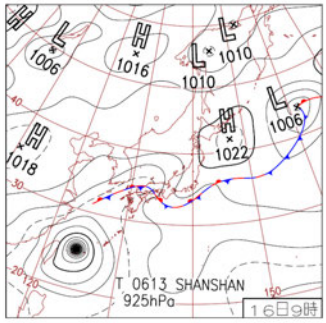
2006/8/30



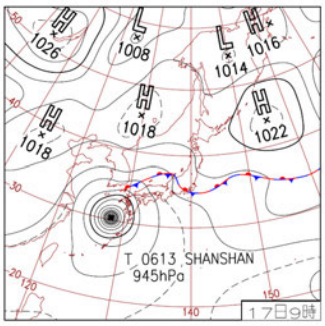
2006/8/31



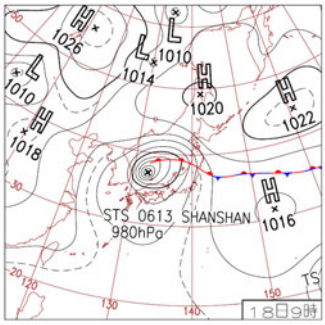
2006/9/9



2006/9/16



2006/9/17



2006/9/18

図 3-102　出水ピーク日の天気図

（1）ピーク精度評価

各水位観測所のピーク精度評価結果を図 3-103～図 3-111、表 3-25～表 3-33 に示す。

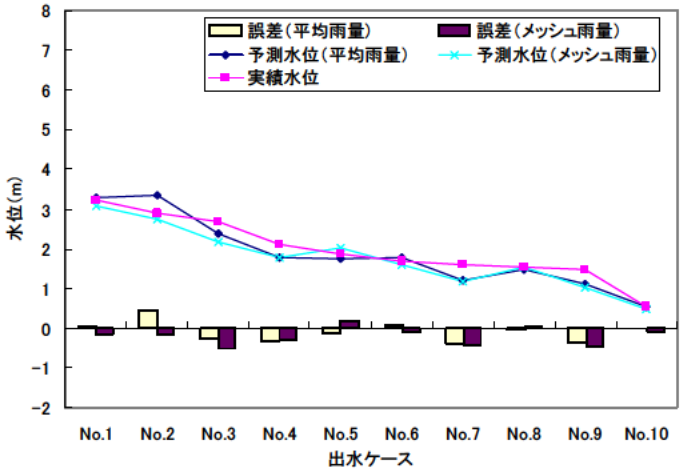


図 3-103　夏吉水位　ピーク精度評価

表 3-25　夏吉水位　ピーク精度評価

	平均雨量			メッシュ雨量		
	予測水位	実績水位	誤差	予測水位	実績水位	誤差
No1	3.279287	3.23	0.049287	3.079861	3.23	-0.15014
No2	3.353061	2.9	0.453061	2.74281	2.9	-0.15719
No3	2.391875	2.67	-0.27813	2.165451	2.67	-0.50455
No4	1.771617	2.11	-0.33838	1.787024	2.11	-0.32298
No5	1.732755	1.86	-0.12725	2.0287	1.86	0.1687
No6	1.769925	1.7	0.069925	1.609216	1.7	-0.09078
No7	1.192827	1.6	-0.40717	1.174929	1.6	-0.42507
No8	1.485489	1.52	-0.03451	1.538041	1.52	0.018041
No9	1.106354	1.46	-0.35365	1.013944	1.46	-0.44606
No10	0.546346	0.55	-0.00365	0.463356	0.55	-0.08664
RMSE			0.266963			0.288153

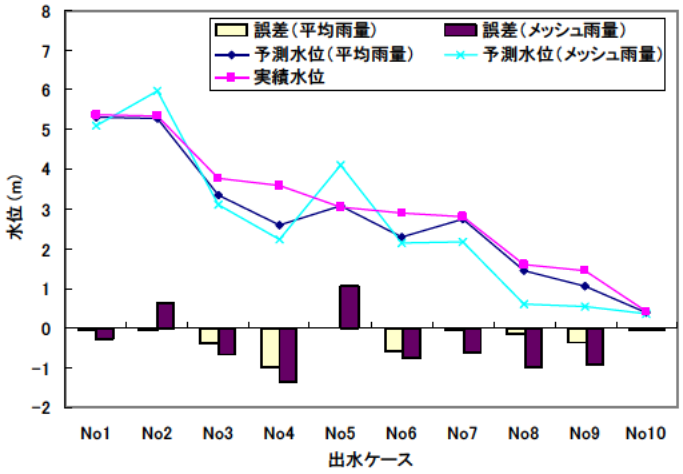


図 3-104　勘六橋水位　ピーク精度評価

表 3-26　勘六橋水位　ピーク精度評価

	平均雨量			メッシュ雨量		
	予測水位	実績水位	誤差	予測水位	実績水位	誤差
No1	5.297984	5.37	-0.07202	5.090641	5.37	-0.27936
No2	5.271895	5.35	-0.07811	5.969034	5.35	0.619034
No3	3.359179	3.77	-0.41082	3.110308	3.77	-0.65969
No4	2.599265	3.59	-0.99073	2.237397	3.59	-1.3526
No5	3.061874	3.06	0.001874	4.104059	3.06	1.044059
No6	2.300158	2.89	-0.58984	2.143646	2.89	-0.74635
No7	2.732094	2.79	-0.05791	2.16982	2.79	-0.62018
No8	1.445955	1.6	-0.15404	0.598249	1.6	-1.00175
No9	1.064892	1.44	-0.37511	0.52285	1.44	-0.91715
No10	0.387383	0.43	-0.04262	0.362227	0.43	-0.06777
RMSE			0.409773			0.812832

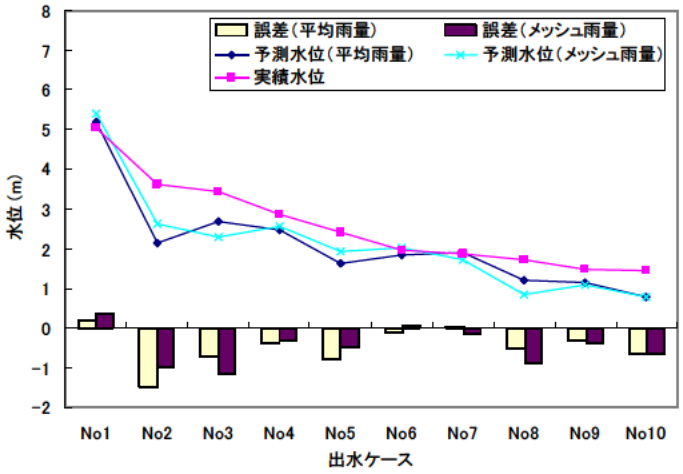


図 3-105　宮田橋水位　ピーク精度評価

表 3-27　宮田橋水位　ピーク精度評価

	平均雨量			メッシュ雨量		
	予測水位	実績水位	誤差	予測水位	実績水位	誤差
No1	5.203027	5.03	0.173027	5.395564	5.03	0.365564
No2	2.128898	3.63	-1.5011	2.636038	3.63	-0.99396
No3	2.697748	3.44	-0.74225	2.295209	3.44	-1.14479
No4	2.485374	2.87	-0.38463	2.55347	2.87	-0.31653
No5	1.628024	2.41	-0.78198	1.926523	2.41	-0.48348
No6	1.839599	1.96	-0.1204	2.021034	1.96	0.061034
No7	1.892321	1.88	0.012321	1.725773	1.88	-0.15423
No8	1.198448	1.72	-0.52155	0.852737	1.72	-0.86726
No9	1.148804	1.47	-0.3212	1.072113	1.47	-0.39789
No10	0.789204	1.44	-0.6508	0.786693	1.44	-0.65331
RMSE			0.66385			0.642718

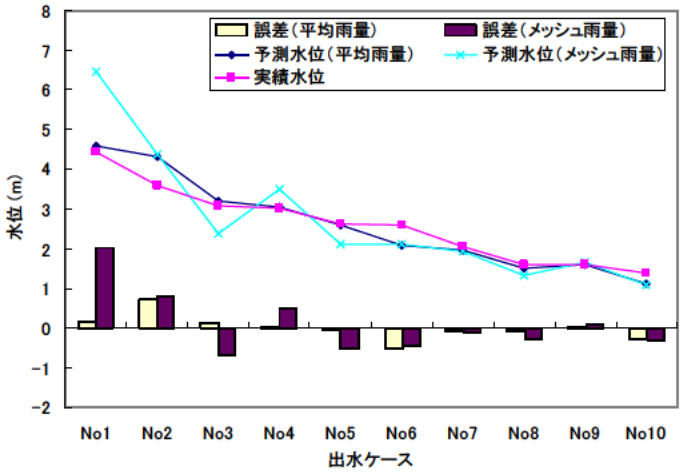


図 3-106　秋松橋水位　ピーク精度評価

表 3-28　秋松橋水位　ピーク精度評価

	平均雨量			メッシュ雨量		
	予測水位	実績水位	誤差	予測水位	実績水位	誤差
No1	4.595464	4.45	0.145464	6.47	4.45	2.02
No2	4.308424	3.59	0.718424	4.361857	3.59	0.771857
No3	3.207819	3.08	0.127819	2.371482	3.08	-0.70852
No4	3.058126	3.02	0.038126	3.496309	3.02	0.476309
No5	2.599854	2.63	-0.03015	2.113141	2.63	-0.51686
No6	2.063659	2.59	-0.52634	2.11792	2.59	-0.47208
No7	1.943676	2.05	-0.10632	1.926719	2.05	-0.12328
No8	1.511671	1.6	-0.08833	1.324408	1.6	-0.27559
No9	1.607604	1.59	0.017604	1.667667	1.59	0.077667
No10	1.104129	1.39	-0.28587	1.093993	1.39	-0.29601
RMSE			0.305641			0.779733

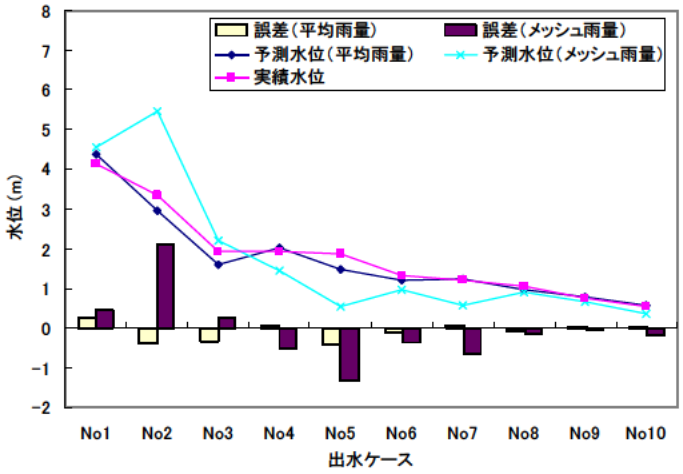


図 3-107　川島水位　ピーク精度評価

表 3-29　川島水位　ピーク精度評価

	平均雨量			メッシュ雨量		
	予測水位	実績水位	誤差	予測水位	実績水位	誤差
No1	4.389377	4.12	0.269377	4.564523	4.12	0.444523
No2	2.956586	3.36	-0.40341	5.457447	3.36	2.097447
No3	1.586792	1.94	-0.35321	2.210093	1.94	0.270093
No4	2.003378	1.94	0.063378	1.430413	1.94	-0.50959
No5	1.460156	1.88	-0.41984	0.537591	1.88	-1.34241
No6	1.188772	1.31	-0.12123	0.949765	1.31	-0.36023
No7	1.231018	1.19	0.041018	0.5534	1.19	-0.6366
No8	0.960647	1.06	-0.09935	0.910894	1.06	-0.14911
No9	0.76683	0.74	0.02683	0.666376	0.74	-0.07362
No10	0.564458	0.55	0.014458	0.361624	0.55	-0.18838
RMSE			0.238228			0.856139

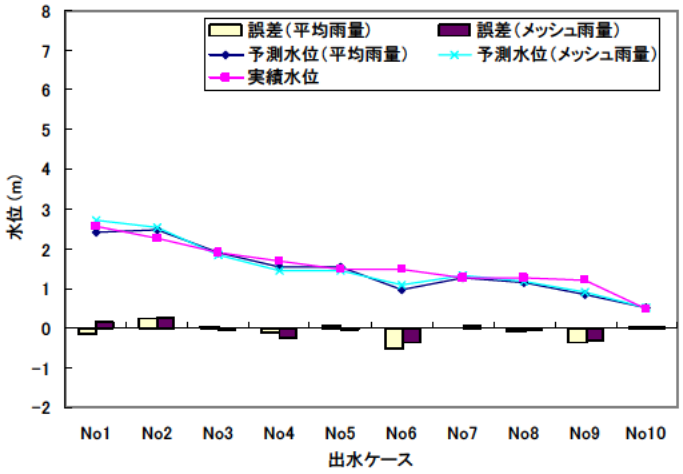


図 3-108　大隈水位ピーク精度評価

表 3-30　大隈水位　ピーク精度評価

	平均雨量			メッシュ雨量		
	予測水位	実績水位	誤差	予測水位	実績水位	誤差
No1	2.399624	2.56	-0.16038	2.705713	2.56	0.145713
No2	2.482858	2.25	0.232858	2.518716	2.25	0.268716
No3	1.91139	1.89	0.02139	1.842886	1.89	-0.04711
No4	1.539691	1.68	-0.14031	1.444221	1.68	-0.23578
No5	1.530195	1.47	0.060195	1.448331	1.47	-0.02167
No6	0.950609	1.46	-0.50939	1.091584	1.46	-0.36842
No7	1.249971	1.27	-0.02003	1.334856	1.27	0.064856
No8	1.1568	1.25	-0.0932	1.185232	1.25	-0.06477
No9	0.826751	1.21	-0.38325	0.896236	1.21	-0.31376
No10	0.498318	0.48	0.018318	0.515498	0.48	0.035498
RMSE			0.227924			0.198887

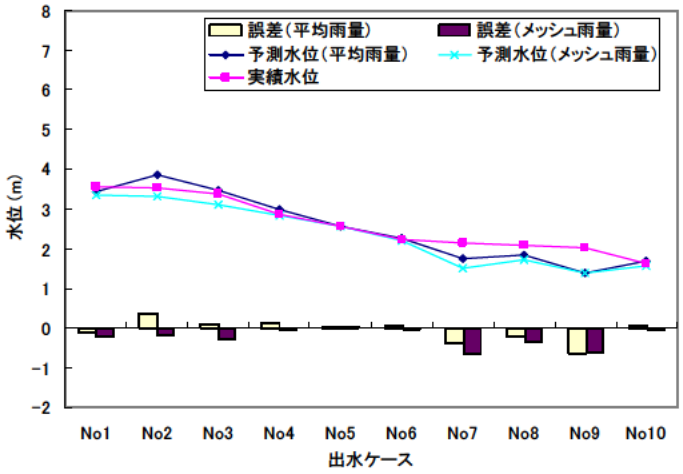


図 3-109　添田水位　ピーク精度評価

表 3-31　添田水位　ピーク精度評価

	平均雨量			メッシュ雨量		
	予測水位	実績水位	誤差	予測水位	実績水位	誤差
No1	3.431353	3.56	-0.12865	3.346213	3.56	-0.21379
No2	3.86404	3.52	0.34404	3.317629	3.52	-0.20237
No3	3.470177	3.38	0.090177	3.098036	3.38	-0.28196
No4	2.972037	2.85	0.122037	2.818964	2.85	-0.03104
No5	2.56394	2.55	0.01394	2.569361	2.55	0.019361
No6	2.274349	2.23	0.044349	2.191013	2.23	-0.03899
No7	1.758274	2.15	-0.39173	1.508105	2.15	-0.6419
No8	1.843763	2.07	-0.22624	1.720637	2.07	-0.34936
No9	1.389701	2.02	-0.6303	1.398376	2.02	-0.62162
No10	1.672411	1.62	0.052411	1.577411	1.62	-0.04259
RMSE			0.276542			0.330354

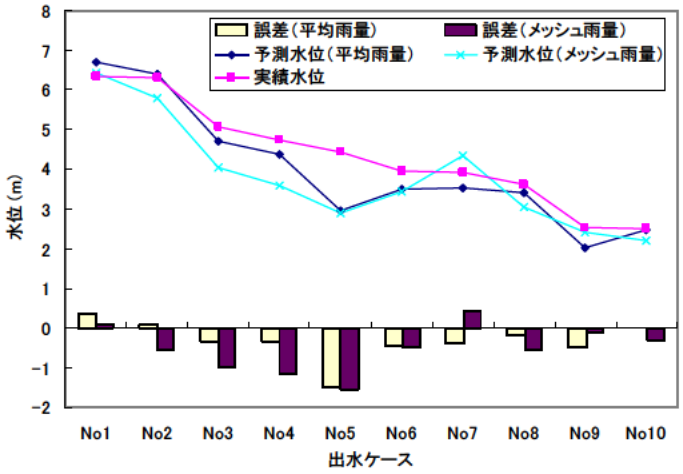


図 3-110　日の出橋水位　ピーク精度評価

表 3-32　日の出橋水位　ピーク精度評価

	平均雨量			メッシュ雨量		
	予測水位	実績水位	誤差	予測水位	実績水位	誤差
No1	6.700166	6.33	0.370166	6.419689	6.33	0.089689
No2	6.399887	6.32	0.079887	5.782467	6.32	-0.53753
No3	4.711192	5.06	-0.34881	4.052774	5.06	-1.00723
No4	4.387643	4.74	-0.35236	3.574157	4.74	-1.16584
No5	2.94678	4.44	-1.49322	2.899392	4.44	-1.54061
No6	3.491277	3.94	-0.44872	3.448123	3.94	-0.49188
No7	3.519361	3.92	-0.40064	4.344376	3.92	0.424376
No8	3.418967	3.61	-0.19103	3.059379	3.61	-0.55062
No9	2.023141	2.52	-0.49686	2.395958	2.52	-0.12404
No10	2.48235	2.49	-0.00765	2.188356	2.49	-0.30164
RMSE			0.571333			0.766534

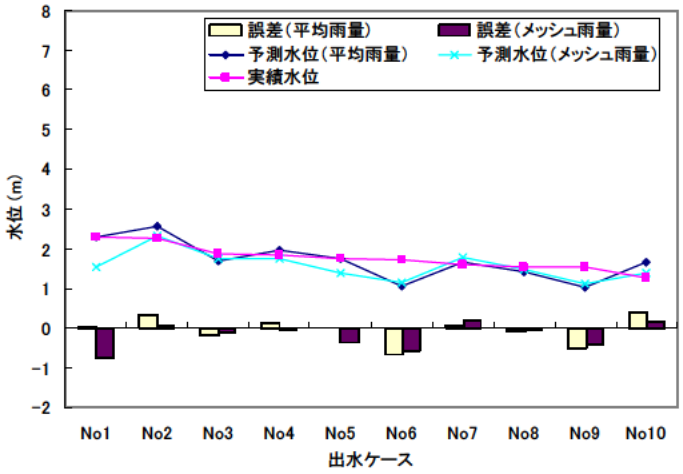


図 3-111　野面水位　ピーク精度評価

表 3-33　野面水位　ピーク精度評価

	平均雨量			メッシュ雨量		
	予測水位	実績水位	誤差	予測水位	実績水位	誤差
No1	2.296659	2.28	0.016659	1.522783	2.28	-0.75722
No2	2.569323	2.25	0.319323	2.31085	2.25	0.06085
No3	1.67819	1.88	-0.20181	1.749642	1.88	-0.13036
No4	1.944771	1.83	0.114771	1.755149	1.83	-0.07485
No5	1.737276	1.74	-0.00272	1.382177	1.74	-0.35782
No6	1.061517	1.72	-0.65848	1.149743	1.72	-0.57026
No7	1.654705	1.59	0.064705	1.761348	1.59	0.171348
No8	1.424358	1.53	-0.10564	1.469445	1.53	-0.06055
No9	1.011437	1.53	-0.51856	1.104201	1.53	-0.4258
No10	1.645911	1.25	0.395911	1.39348	1.25	0.14348
RMSE			0.321053			0.358863

平均雨量とメッシュ雨量の違いを比較するため、各出水イベントについてメッシュ雨量よりも平均雨量を用いた方が予測誤差が小さくなるケースをまとめた結果を表 3-34 に示す。いずれの観測所においてもメッシュ雨量より平均雨量を用いた方が誤差が小さくなる割合が高いことが分かる。

表 3-34　メッシュ雨量モデルに対して平均雨量モデルのピーク誤差が小さくなるケース

（観測所名の括弧は雨量メッシュ数）

	小 ← 流域面積 → 大								
	野面 (2)	添田 (9)	**夏吉** (11)	大隈 (15)	秋松橋 (15)	宮田橋 (21)	川島 (38)	勘六橋 (49)	日の出橋 (91)
No.1	○	○	○		○	○	○	○	
No.2				○	○		○	○	○
No.3		○	○	○	○	○		○	○
No.4				○	○		○	○	○
No.5	○	○	○		○		○	○	○
No.6			○				○	○	○
No.7	○	○	○	○	○	○	○	○	○
No.8		○			○	○	○	○	○
No.9			○		○	○	○	○	
No.10			○	○	○	○	○	○	○
計	3 (30%)	5 (50%)	7 (70%)	5 (50%)	9 (90%)	6 (60%)	9 (90%)	10 (100%)	8 (80%)

次に、平均雨量とメッシュ雨量のピーク予測誤差の平均値を図 3-112 に示す。流域面積の小さい水位観測所に比べて、流域面積の大きな水位観測所の方がメッシュ雨量の誤差が大きくなるケースが多いことが分かる。

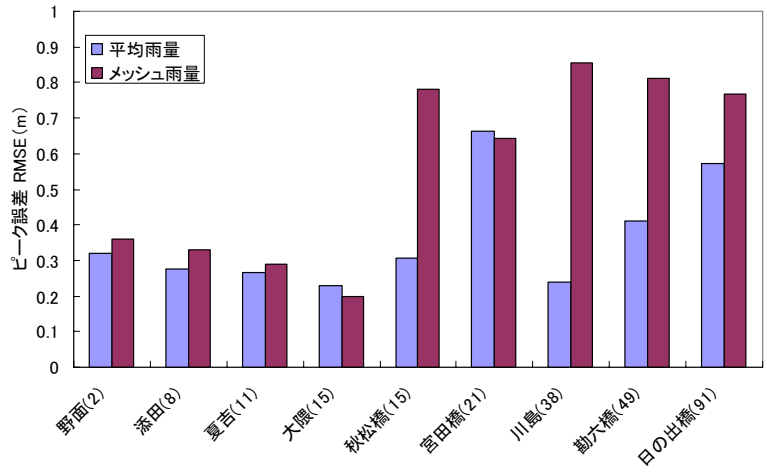


図 3-112　TOP10 出水のピーク誤差比較

（2）立上り・立下り評価

各水位観測所の立上りと立下りの精度評価結果を図 3-113～図 3-130、表 3-35～表 3-43 に示す。

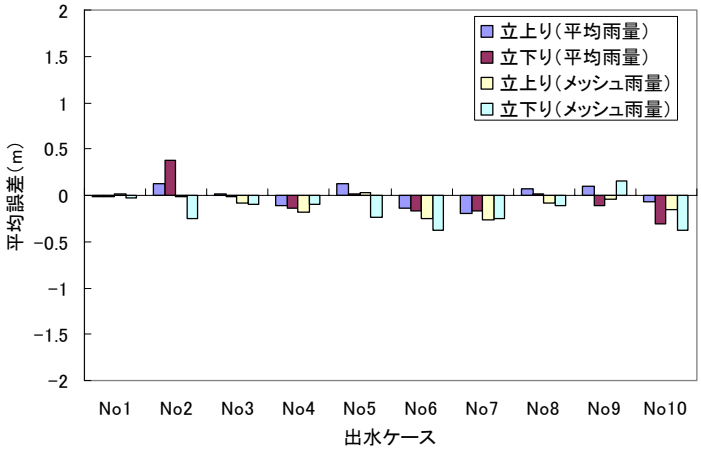


図 3-113　夏吉水位　立上り・立下り精度評価（平均誤差）

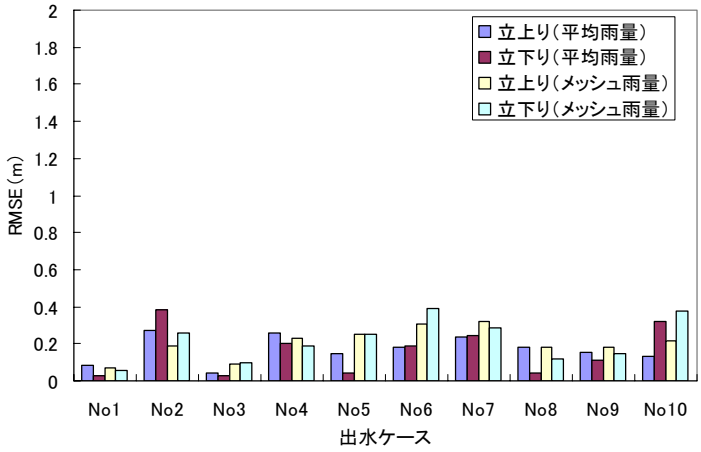


図 3-114　夏吉水位　立上り・立下り精度評価（RMSE）

表 3-35　夏吉水位　立上り・立下り精度評価

	平均雨量				メッシュ雨量			
	平均誤差		RMSE		平均誤差		RMSE	
	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り
No.1	-0.00931	-0.02047	0.084651	0.028808	0.015867	-0.02571	0.066343	0.05295
No.2	0.122298	0.379405	0.268527	0.384805	-0.01719	-0.24647	0.185464	0.254796
No.3	0.010137	-0.01979	0.040799	0.026321	-0.08304	-0.09872	0.092625	0.099527
No.4	-0.1063	-0.14347	0.255267	0.2051	-0.18034	-0.09652	0.22993	0.189577
No.5	0.119164	0.018835	0.147008	0.039032	0.02675	-0.24243	0.247881	0.251538
No.6	-0.13583	-0.1745	0.181471	0.189505	-0.25287	-0.3787	0.306786	0.389196
No.7	-0.19613	-0.17297	0.236778	0.246497	-0.26561	-0.25461	0.323899	0.283316
No.8	0.076543	0.014212	0.179283	0.041937	-0.08827	-0.11314	0.184417	0.115418
No.9	0.097513	-0.10598	0.152521	0.108038	-0.04367	0.148728	0.178319	0.149512
No.10	-0.06505	-0.31156	0.134943	0.317082	-0.16055	-0.37363	0.216126	0.37896

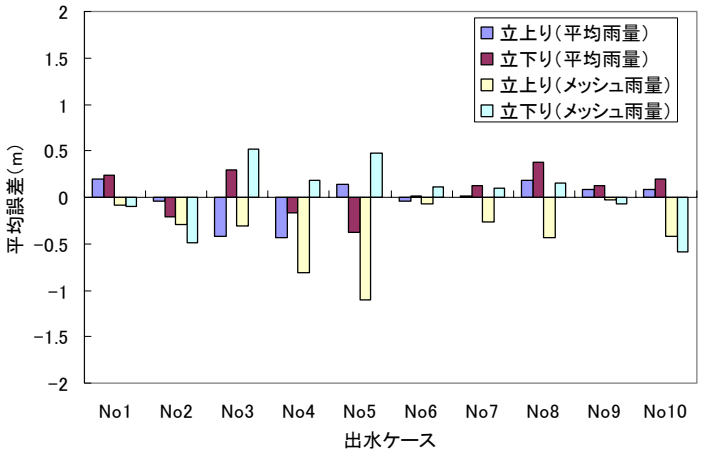


図 3-115　勘六橋水位　立上り・立下り精度評価（平均誤差）

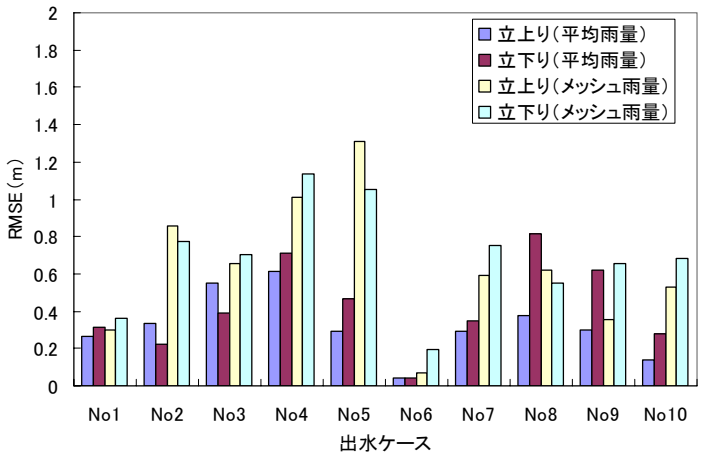


図 3-116　勘六橋水位　立上り・立下り精度評価（RMSE）

表 3-36　勘六橋水位　立上り・立下り精度評価

	平均雨量				メッシュ雨量			
	平均誤差		RMSE		平均誤差		RMSE	
	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り
No.1	0.19253	0.236108	0.262241	0.31071	-0.07782	-0.09783	0.299884	0.362417
No.2	-0.0447	-0.20405	0.336811	0.225084	-0.28871	-0.486	0.858962	0.774764
No.3	-0.42441	0.29165	0.551911	0.388512	-0.31107	0.515452	0.654368	0.706922
No.4	-0.42978	-0.16514	0.61418	0.711061	-0.80782	0.17972	1.012484	1.133737
No.5	0.141381	-0.37719	0.290024	0.469183	-1.10314	0.477858	1.310383	1.053155
No.6	-0.04186	0.01028	0.042765	0.040117	-0.06764	0.107164	0.067988	0.196117
No.7	0.013905	0.127174	0.292407	0.348922	-0.2612	0.096734	0.588876	0.750834
No.8	0.179951	0.382655	0.373313	0.812237	-0.43908	0.152195	0.623211	0.553988
No.9	0.084135	0.122271	0.302794	0.619042	-0.02285	-0.0733	0.352822	0.6553
No.10	0.078159	0.19159	0.138551	0.275641	-0.42298	-0.58123	0.527762	0.679764

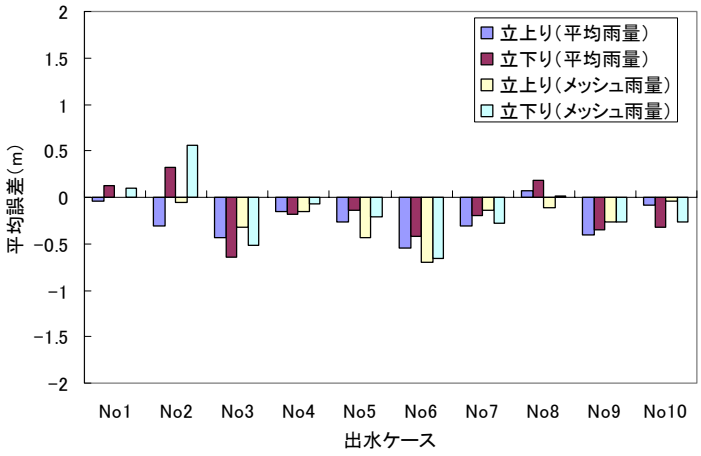


図 3-117　宮田橋水位　立上り・立下り精度評価（平均誤差）

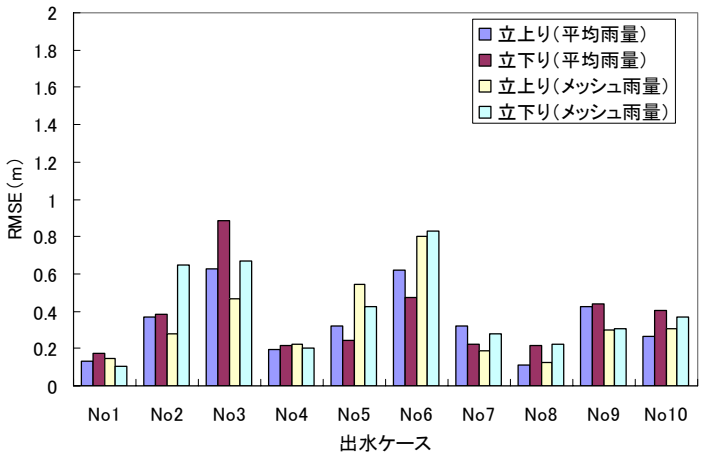


図 3-118　宮田橋水位　立上り・立下り精度評価（RMSE）

表 3-37　宮田橋水位　立上り・立下り精度評価

	平均雨量				メッシュ雨量			
	平均誤差		RMSE		平均誤差		RMSE	
	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り
No.1	-0.03647	0.121365	0.131365	0.17637	-0.00544	0.097037	0.148151	0.104557
No.2	-0.30242	0.319432	0.370928	0.382015	-0.05884	0.556758	0.277363	0.645601
No.3	-0.42873	-0.64443	0.625574	0.882138	-0.32158	-0.51341	0.467366	0.671229
No.4	-0.15673	-0.17947	0.197937	0.216277	-0.1578	-0.06802	0.224396	0.199135
No.5	-0.26043	-0.14169	0.320661	0.241095	-0.4379	-0.21342	0.545422	0.421612
No.6	-0.54917	-0.41811	0.622853	0.477067	-0.70194	-0.65713	0.803098	0.828362
No.7	-0.31222	-0.19881	0.317141	0.22503	-0.14681	-0.27285	0.184669	0.279957
No.8	0.072462	0.188075	0.108917	0.217934	-0.11354	0.016973	0.128214	0.225885
No.9	-0.39872	-0.34667	0.425633	0.436806	-0.27016	-0.26339	0.296454	0.30957
No.10	-0.08503	-0.3243	0.26284	0.404232	-0.03548	-0.26461	0.30778	0.372496

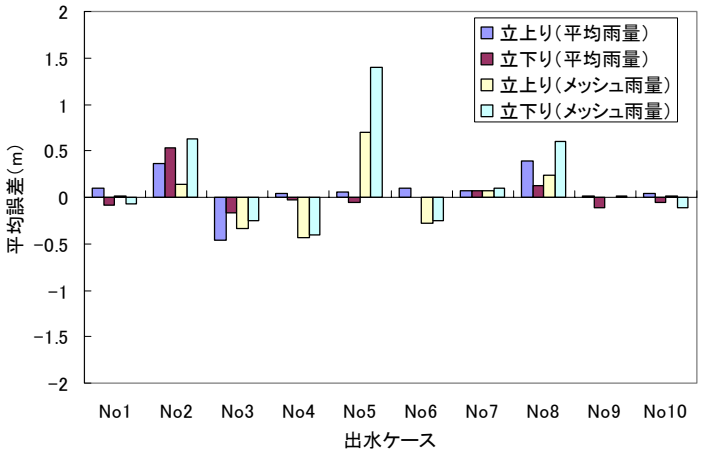


図 3-119　秋松橋水位　立上り・立下り精度評価（平均誤差）

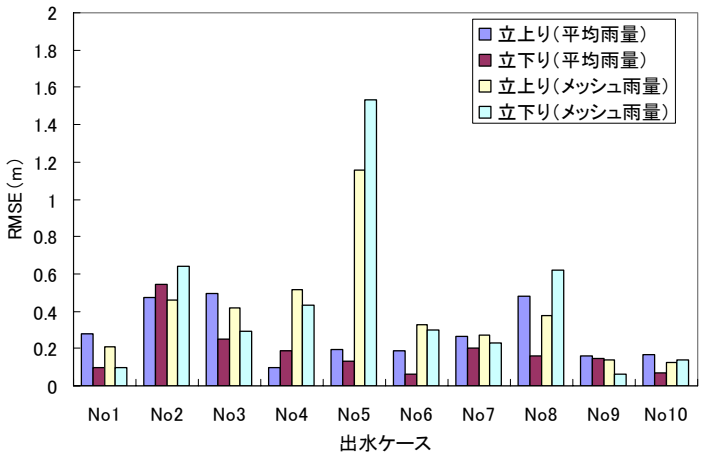


図 3-120　秋松橋水位　立上り・立下り精度評価（RMSE）

表 3-38　秋松橋水位　立上り・立下り精度評価

	平均雨量				メッシュ雨量			
	平均誤差		RMSE		平均誤差		RMSE	
	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り
No.1	0.09432	-0.0833	0.276386	0.096724	0.008051	-0.06739	0.210954	0.100439
No.2	0.365381	0.531978	0.475441	0.543537	0.144185	0.626613	0.460266	0.638163
No.3	-0.45474	-0.1651	0.497233	0.248532	-0.3353	-0.25725	0.421452	0.292441
No.4	0.044462	-0.03437	0.094474	0.189076	-0.4356	-0.40194	0.514034	0.434538
No.5	0.050052	-0.05937	0.194566	0.131895	0.703554	1.396668	1.155489	1.533466
No.6	0.103221	4.94E-06	0.188408	0.065627	-0.2771	-0.2555	0.330436	0.296436
No.7	0.074393	0.074719	0.265406	0.202709	0.065026	0.09926	0.270273	0.233357
No.8	0.388881	0.126151	0.483486	0.158395	0.240959	0.605832	0.379375	0.620508
No.9	0.01086	-0.11652	0.161511	0.147404	0.00224	0.013632	0.141007	0.063654
No.10	0.041445	-0.05731	0.167625	0.069159	0.020716	-0.10956	0.126746	0.140592

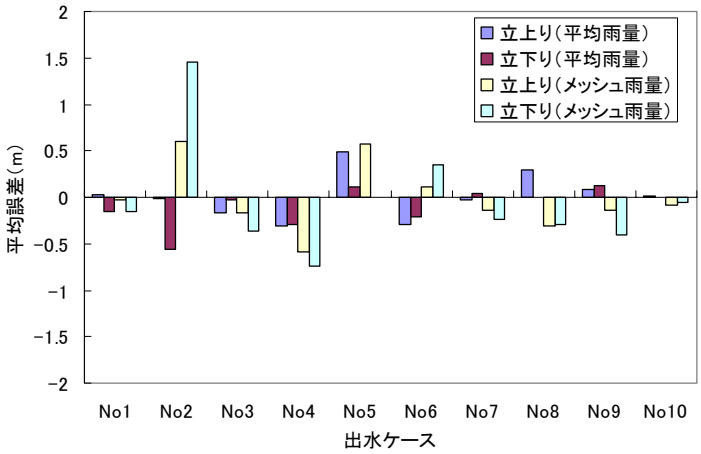


図 3-121　川島水位　立上り・立下り精度評価（平均誤差）

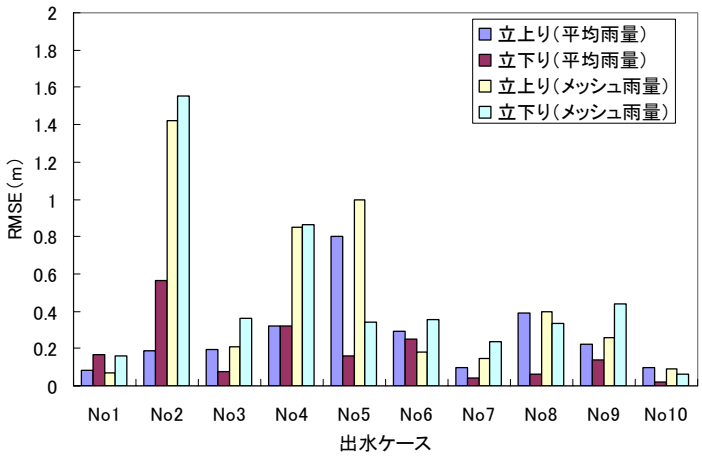


図 3-122　川島水位　立上り・立下り精度評価（RMSE）

表 3-39　川島水位　立上り・立下り精度評価

	平均雨量				メッシュ雨量			
	平均誤差		RMSE		平均誤差		RMSE	
	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り
No.1	0.023899	-0.1602	0.081165	0.166487	-0.03448	-0.15783	0.068098	0.158652
No.2	-0.01858	-0.55537	0.190511	0.567734	0.601514	1.458526	1.423622	1.55731
No.3	-0.16147	-0.0222	0.192989	0.074303	-0.16589	-0.36204	0.210472	0.363239
No.4	-0.30753	-0.29473	0.317648	0.319642	-0.58495	-0.73599	0.850491	0.866351
No.5	0.493808	0.116345	0.800579	0.159668	0.578352	0.005292	0.994774	0.338583
No.6	-0.28699	-0.21521	0.292407	0.249532	0.11232	0.349833	0.184013	0.355915
No.7	-0.0303	0.037207	0.096451	0.041067	-0.1418	-0.23238	0.145629	0.235957
No.8	0.297287	0.006472	0.391202	0.059654	-0.31006	-0.29227	0.394504	0.333684
No.9	0.088715	0.126233	0.220457	0.140433	-0.14148	-0.40126	0.260659	0.43759
No.10	0.014669	-0.00048	0.096529	0.020415	-0.08352	-0.06016	0.087719	0.062002

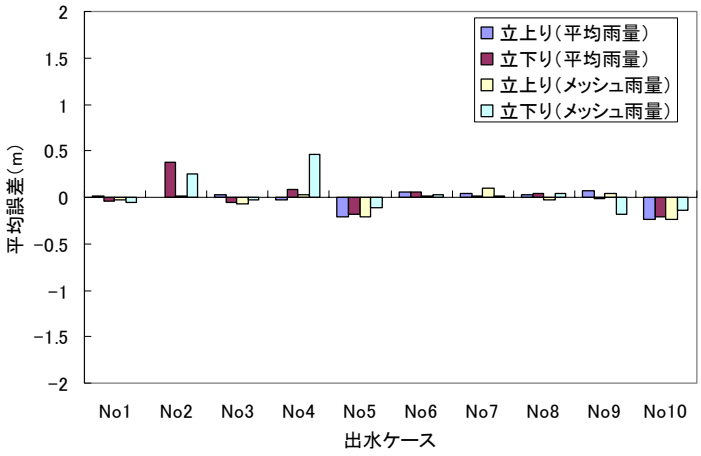


図 3-123　大隈水位　立上り・立下り精度評価（平均誤差）

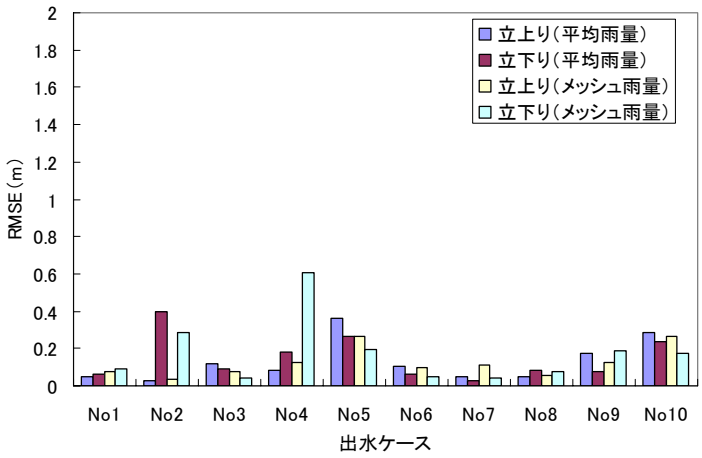


図 3-124　大隈水位　立上り・立下り精度評価（RMSE）

表 3-40　大隈水位　立上り・立下り精度評価

	平均雨量				メッシュ雨量			
	平均誤差		RMSE		平均誤差		RMSE	
	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り
No.1	0.011579	-0.03914	0.047384	0.063534	-0.03028	-0.06199	0.07534	0.088464
No.2	0.00129	0.383537	0.025544	0.398969	0.014976	0.255046	0.034808	0.283193
No.3	0.023111	-0.06101	0.118585	0.092659	-0.0765	-0.0298	0.07739	0.038338
No.4	-0.0255	0.081424	0.085586	0.183357	0.032348	0.461523	0.123382	0.603153
No.5	-0.21064	-0.17568	0.365542	0.262647	-0.20997	-0.11065	0.263044	0.195589
No.6	0.060037	0.05282	0.107353	0.063587	0.0139	0.026254	0.094851	0.047118
No.7	0.039298	0.018174	0.05207	0.029152	0.096393	0.012288	0.113521	0.042923
No.8	0.024907	0.045202	0.046417	0.08493	-0.02789	0.047284	0.057039	0.073723
No.9	0.072626	-0.01814	0.175885	0.074426	0.041922	-0.17813	0.128012	0.190458
No.10	-0.23395	-0.20367	0.282637	0.236733	-0.23383	-0.13426	0.266077	0.175033

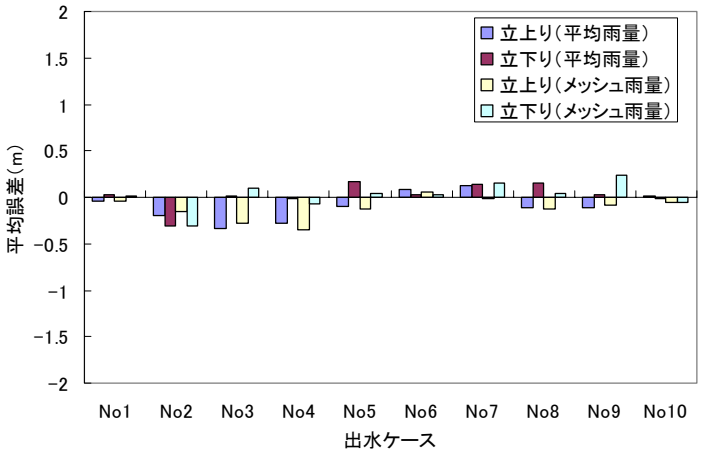


図 3-125　添田水位　立上り・立下り精度評価（平均誤差）

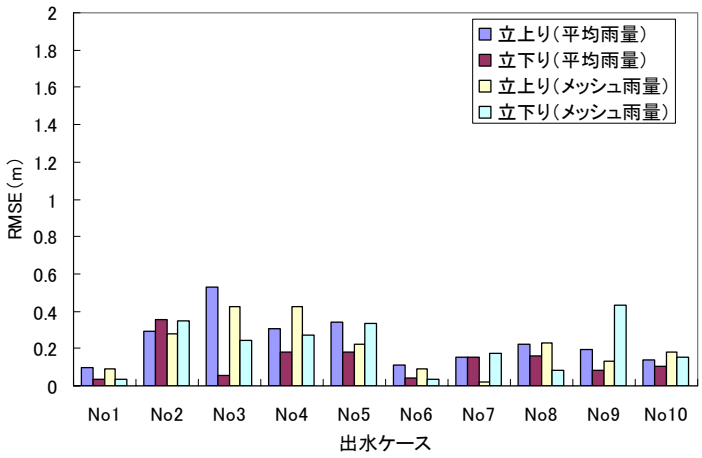


図 3-126　添田水位　立上り・立下り精度評価（RMSE）

表 3-41　添田水位　立上り・立下り精度評価

	平均雨量				メッシュ雨量			
	平均誤差		RMSE		平均誤差		RMSE	
	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り
No.1	-0.04121	0.027779	0.099422	0.036911	-0.04421	0.01907	0.088157	0.035483
No.2	-0.19105	-0.30234	0.291865	0.358156	-0.15136	-0.30614	0.277656	0.348524
No.3	-0.33037	0.018997	0.53269	0.058616	-0.2807	0.092707	0.423848	0.245343
No.4	-0.276	-0.01537	0.303589	0.180419	-0.3563	-0.06779	0.427539	0.269056
No.5	-0.09745	0.165136	0.342905	0.183871	-0.13075	0.046877	0.224016	0.33255
No.6	0.079505	0.030047	0.111634	0.041197	0.052532	0.021815	0.09398	0.032508
No.7	0.12666	0.135005	0.153491	0.150939	-0.01741	0.151871	0.024161	0.177698
No.8	-0.11093	0.147947	0.220804	0.160411	-0.12686	0.047313	0.233039	0.082769
No.9	-0.11467	0.022521	0.193558	0.080172	-0.08537	0.23121	0.131947	0.431209
No.10	0.007499	-0.01206	0.139472	0.102896	-0.05026	-0.05564	0.180034	0.151964

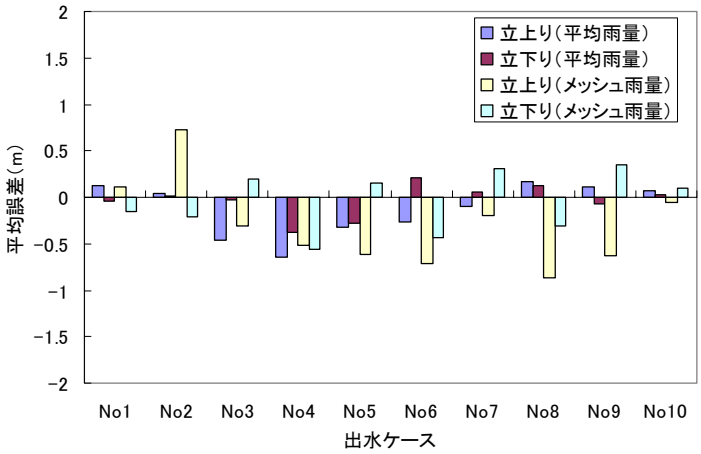


図 3-127　日の出橋水位　立上り・立下り精度評価（平均誤差）

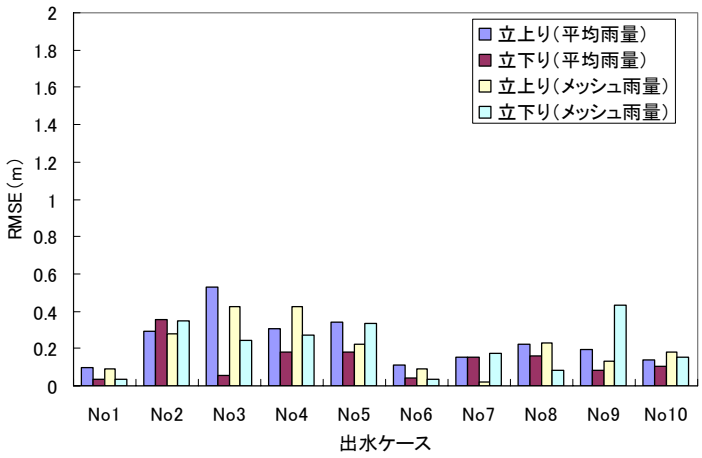


図 3-128　日の出橋水位　立上り・立下り精度評価（RMSE）

表 3-42　日の出橋水位　立上り・立下り精度評価

	平均雨量				メッシュ雨量			
	平均誤差		RMSE		平均誤差		RMSE	
	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り
No.1	0.12057	-0.04101	0.206084	0.132416	0.105075	-0.15814	0.317429	0.291201
No.2	0.038569	0.018777	0.352014	0.193945	0.724414	-0.20659	1.070066	0.252108
No.3	-0.46176	-0.02523	0.528729	0.200369	-0.3043	0.190235	0.470293	0.235327
No.4	-0.64697	-0.37066	0.828327	0.724696	-0.51459	-0.55615	0.896367	1.066326
No.5	-0.3199	-0.28634	0.449511	0.368798	-0.61448	0.150941	0.832053	0.563725
No.6	-0.26332	0.210051	0.273159	0.53443	-0.71341	-0.43182	0.815988	0.648233
No.7	-0.10437	0.054554	0.249121	0.246438	-0.20025	0.307443	0.206289	0.365729
No.8	0.166221	0.125578	0.287088	0.523339	-0.87242	-0.30409	1.022831	0.601838
No.9	0.115831	-0.06457	0.352089	0.316433	-0.63558	0.355952	0.664564	0.580383
No.10	0.070814	0.025844	0.092283	0.050351	-0.05219	0.098363	0.210377	0.248748

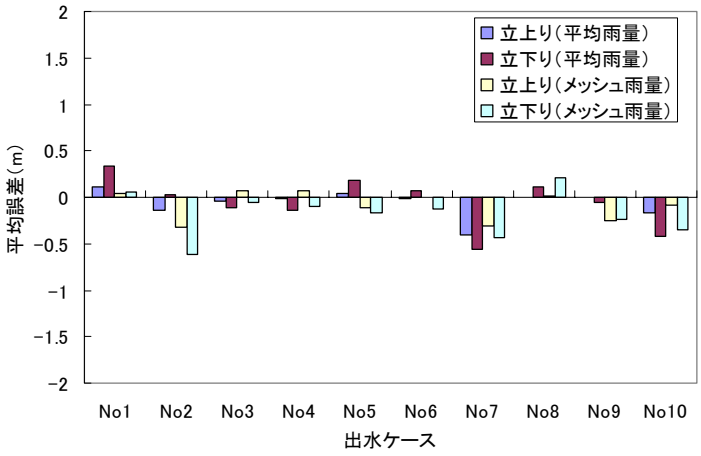


図 3-129　野面水位　立上り・立下り精度評価（平均誤差）

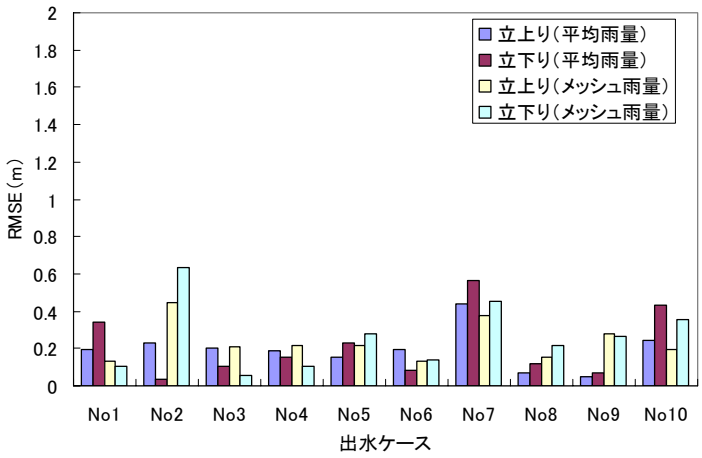


図 3-130　野面水位　立上り・立下り精度評価（RMSE）

表 3-43　野面水位　立上り・立下り精度評価

	平均雨量				メッシュ雨量			
	平均誤差		RMSE		平均誤差		RMSE	
	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り
No.1	0.107919	0.337192	0.19695	0.342266	0.047462	0.056541	0.129197	0.103707
No.2	-0.14573	0.033583	0.229092	0.037606	-0.32229	-0.6215	0.44726	0.636145
No.3	-0.03534	-0.10738	0.20113	0.107395	0.072954	-0.05626	0.207566	0.056426
No.4	-0.01225	-0.14243	0.189958	0.154311	0.073258	-0.09914	0.216393	0.103941
No.5	0.048697	0.177022	0.149967	0.227126	-0.11847	-0.1649	0.216156	0.279569
No.6	-0.00851	0.06797	0.19282	0.082524	0.006559	-0.13058	0.13029	0.141973
No.7	-0.40314	-0.55797	0.437631	0.566948	-0.31288	-0.43441	0.373099	0.455154
No.8	-0.00327	0.111128	0.068053	0.120435	0.01815	0.21366	0.154269	0.217809
No.9	-0.00336	-0.05028	0.04828	0.069213	-0.2519	-0.24057	0.278218	0.267624
No.10	-0.17161	-0.41912	0.241014	0.430755	-0.08678	-0.34561	0.193485	0.354789

平均雨量とメッシュ雨量の違いを比較するため、各出水イベントについてメッシュ雨量よりも平均雨量を用いた方が予測誤差が小さくなるケースを調査した結果を表 3-44 に示す。メッシュ雨量より平均雨量を用いた方が誤差が小さくなる割合が高いことが分かる。

表 3-44　メッシュ雨量モデルに対して平均雨量モデルの立上り・立下り誤差が小さくなるケース

（観測所名の括弧は雨量メッシュ数）

	小		←		流域面積		→		中	
	野面 (2)		添田 (9)		**夏吉** (11)		大隈 (15)		秋松橋 (15)	
	立上り	**立下り**	**立上り**	**立下り**	**立上り**	**立下り**	**立上り**	**立下り**	**立上り**	**立下り**
No.1						○	○	○		○
No.2	○	○					○			○
No.3	○			○	○	○				○
No.4	○		○	○			○	○	○	○
No.5	○	○		○	○	○			○	○
No.6		○			○	○			○	○
No.7				○	○	○	○	○	○	○
No.8	○	○	○		○	○	○			○
No.9	○	○		○	○	○		○		
No.10			○	○	○	○				○
計	6 (60%)	5 (50%)	3 (30%)	6 (60%)	7 (70%)	8 (80%)	5 (50%)	4 (40%)	4 (40%)	9 (90%)

	中		←		流域面積		→		大	
	宮田橋 (21)		川島 (38)		勘六橋 (49)		日の出橋 (91)			
	立上り	**立下り**	**立上り**	**立下り**	**立上り**	**立下り**	**立上り**	**立下り**		
No.1	○				○					
No.2		○	○	○		○	○	○		
No.3			○	○			○	○		
No.4	○		○	○	○		○	○		
No.5	○	○	○	○	○	○	○	○		
No.6	○	○		○	○	○		○		
No.7		○	○	○		○	○	○		
No.8	○	○	○	○	○	○	○	○		
No.9			○	○			○	○		
No.10	○			○	○			○		
計	6 (60%)	5 (50%)	7 (70%)	9 (90%)	6 (60%)	5 (50%)	7 (70%)	9 (90%)		

3.3.6. 学習データの範囲と未知データの範囲

計算に用いた学習データと未知データの水位、雨量の最大/最小値を図 3-131～図 3-140 に示す。平均雨量モデルではほとんどのケースで未知データが学習データの範囲内に収まっているが、メッシュ雨量モデルでは学習範囲を逸脱しているケースが多いことが分かる。学習データが十分揃っている場合にはメッシュ雨量モデルを用いても安定した予測を行えると考えられるが、十分揃っていない場合には平均雨量モデルに比べて不安定性が増すと考えられる。

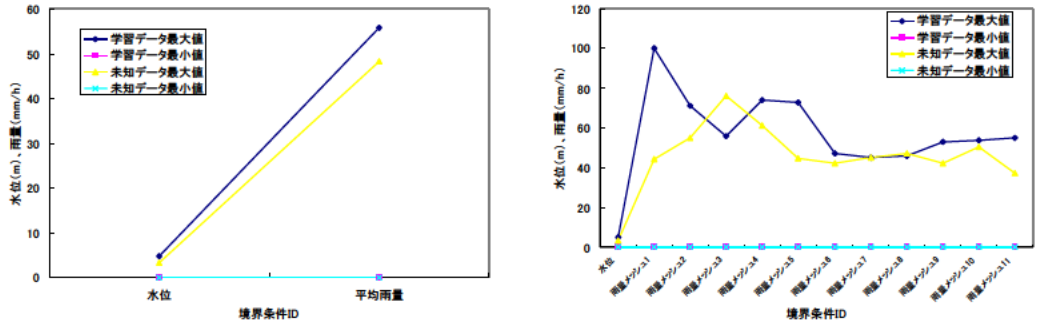


図 3-131　夏吉モデルの要素別データ範囲（左：平均雨量、右メッシュ雨量）

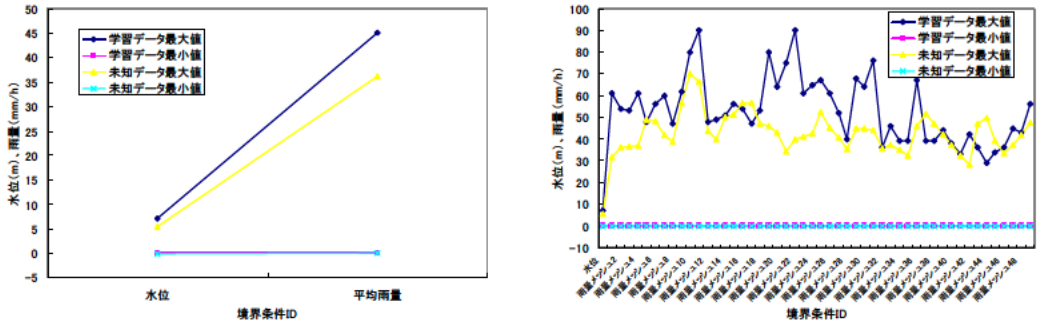


図 3-132　勘六橋モデルの要素別データ範囲（左：平均雨量、右メッシュ雨量）

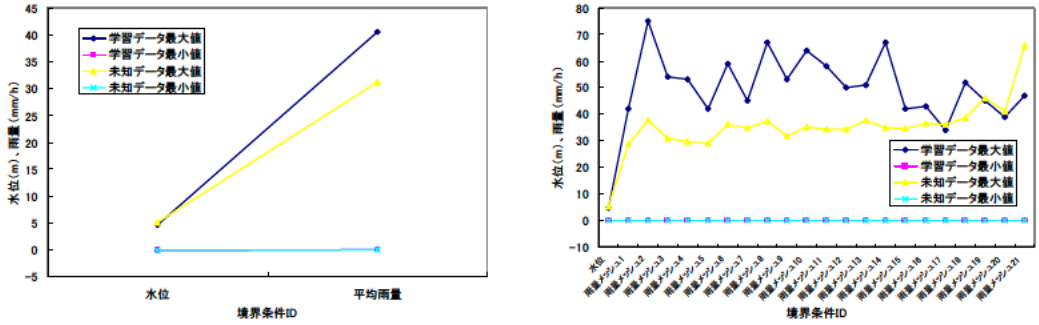


図 3-133　宮田橋モデルの要素別データ範囲（左：平均雨量、右メッシュ雨量）

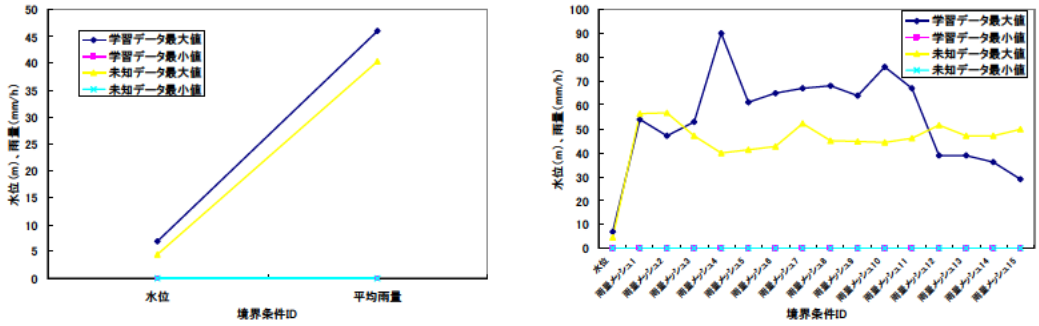


図 3-134　秋松橋モデルの要素別データ範囲（左：平均雨量、右メッシュ雨量）

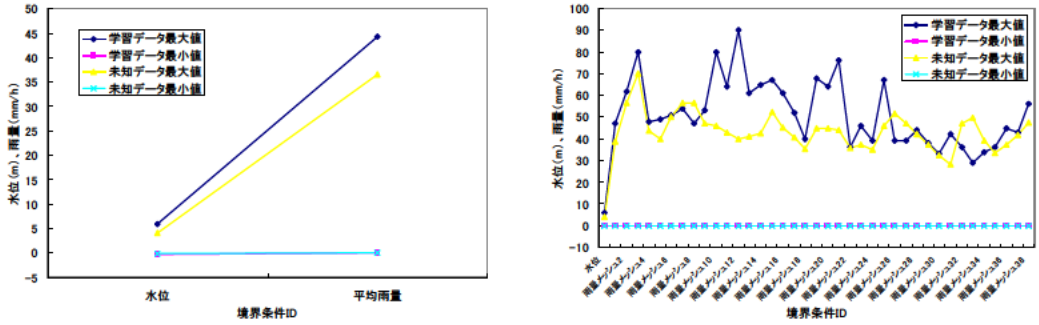


図 3-135　川島モデルの要素別データ範囲（左：平均雨量、右メッシュ雨量）

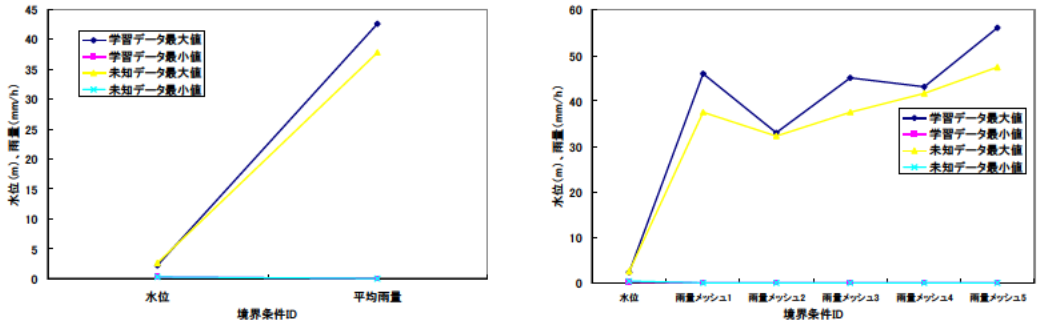


図 3-136　大隈モデルの要素別データ範囲（左：平均雨量、右メッシュ雨量）

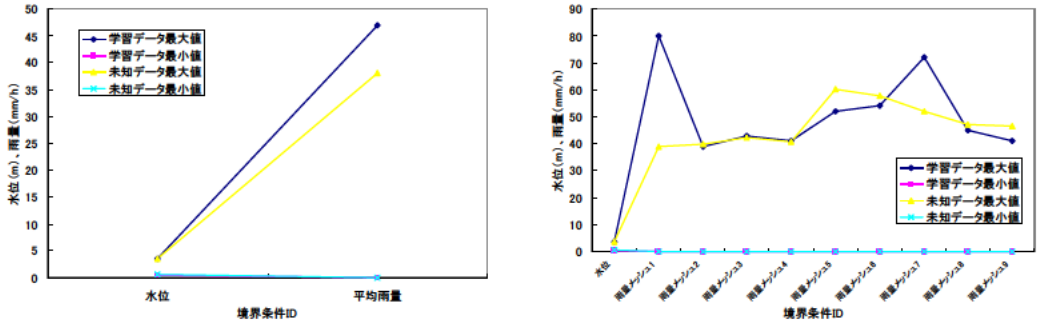


図 3-137　添田モデルの要素別データ範囲（左：平均雨量、右メッシュ雨量）

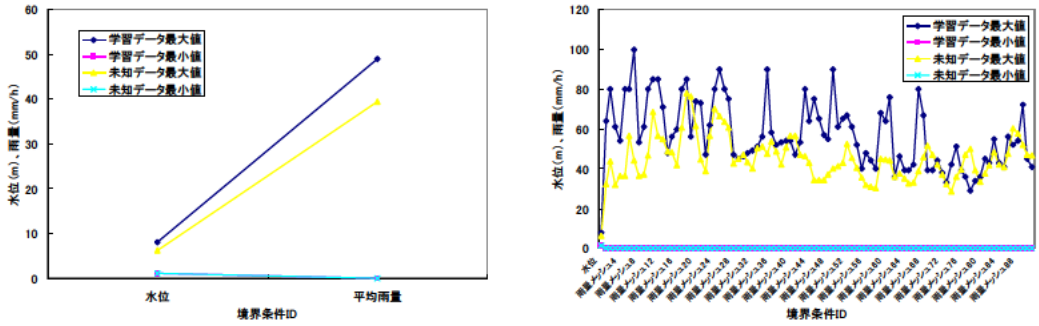


図 3-138　日の出橋モデルの要素別データ範囲（左：平均雨量、右メッシュ雨量）

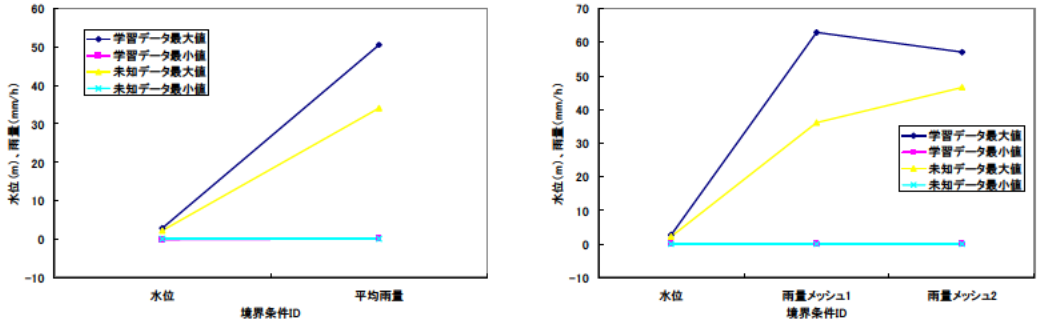


図 3-139　野面モデルの要素別データ範囲（左：平均雨量、右メッシュ雨量）

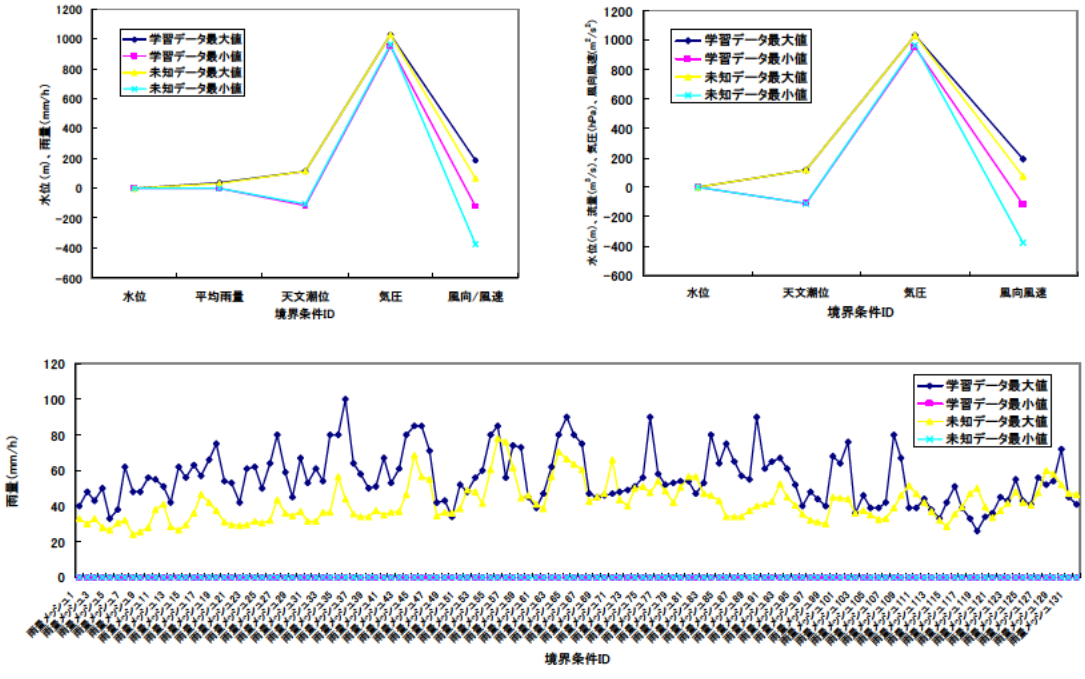


図 3-140　祇園橋モデルの要素別データ範囲（左：平均雨量、右及び下：メッシュ雨量）

3.3.7. まとめ

遠賀川の事例では、4年分のデータを用いて大隈、川島、勘六橋、日の出橋、野面、祇園橋、宮田橋、添田、夏吉、秋松橋の各水位予測モデルを構築し、それ以外の1年分のデータを用いて予測検証を実施した。本流域は上流から下流に至るまで様々な流域スケールを含んでいるため、水位地点ごとの予測特性を検証するのに適している。そこで本解析では、流域面積8.1km^{2}から686km^{2}までの各水位地点を選定した。なお、下流の祇園橋地点は感潮域であるため、モデルの入力条件に天文潮位、気圧、風圧を追加してモデルを構築した。水位の高さごとに予測先行時間と予測誤差の関係を検証した結果、予測先行時間が大きくなるほど予測誤差も大きくなるものの、6時間先の予測においても一部の例外を除きRMSE誤差が1m以内に収まっており、実用上十分な予測精度であることを確認した。また、学習トレースと未知データ予測の精度比較を行った結果、学習トレースではメッシュ雨量を用いた方が高精度となるケースが多くなるが、未知データ予測では逆に平均雨量を用いた方が高精度となるケースが多くなり、平均雨量モデルを用いた方が未知データに対する予測安定性が高くなることを確認した。また未知データの中から10出水を抽出し、立上り・ピーク・立下りの精度評価を実施した結果では、流域面積が大きい水位観測地点ほど平均雨量モデルの予測精度が高くなることを確認した。これは、メッシュ雨量間の相関が高い場合、メッシュ雨量と水位の因果関係をメッシュごとに正しく同定することが困難となるためである。学習トレースでは誤差が小さくても、未知データ予測で誤差が増大するのはこのためである。本検証の結果では、適切な雨量データを入力することにより、実用上十分な精度の予測モデルを構築できることを確認した。本手法の適用により、全国の様々な流域スケールの河川において高精度な水位予測モデルを構築できるものと期待される。

3.4. 酒匂川水位予測解析

酒匂川の水位予測シミュレーションの検討を実施した。対象流域の概要を以下に示し、観測データの概要を表 3-45 に示す。また、流域配置図を図 3-141 に示す。

（1）水系

水系：酒匂川（２級河川）

延長：46km

流域面積：582km^2

流域：静岡県、神奈川県

管理：静岡県、神奈川県

（2）データ期間

2004～2006 年の 1 時間データ。なお、水位及びダムは 10 分データから抽出。

（3）実績水位

新甘柿橋、平山三保ダム、松田の各水位観測所データ。

表 3-45　観測データ概要

観測所	指定水位 (m)	警戒水位 (m)	特別水位 (m)	越水水位 (m)	豊水位 (m)	流域面積 (km^2)
新甘柿橋	1.50	1.60	1.79	2.59	10.99	10.9
平山三保ダム	2.00	3.00	3.50	4.00	13.99	158.5
松田	2.00	3.00	3.50	4.00	23.99	356.6

（3）実績雨量

気象庁レーダーアメダス解析雨量（2.5km メッシュ）

（4）ダム放流量

三保ダム観測放流量データ

（５）流域配置図



図 3-141　酒匂川流域配置図

3.4.1. 水位予測モデルの構築

松田、新甘柿橋、平山三保ダムの各水位予測モデルを構築した。水位予測モデルの作成に用いたデータは水位とレーダーアメダス解析雨量の時間毎データとした。水位は10分データのうち毎正時の値を使用した。ダム下流に位置している松田および平山三保ダムの各水位観測所においては三保ダム放流量も境界条件として追加した。学習期間は2004～2005年、予測期間は2006年とした。

各水位予測モデルを式3-7、式3-8に示し、表3-46に各モデルの過去参照時間を示す。精度比較のため、メッシュ雨量を1要素に単純平均してから入力する「平均雨量モデル」と、メッシュ雨量を平均化せずにメッシュ数分の要素で入力する「メッシュ雨量モデル」をそれぞれ構築した。

ダムなしモデル（新甘柿橋）：

$$H(t+1)=f\left(H(t),\ldots,H(t-t_H+1),R(t+1),\ldots,R(t-t_R+2),\right) \quad \text{式 3-7}$$

ダムありモデル（松田、平山三保ダム）：

$$H(t+1)=f\left(H(t),\ldots,H(t-t_H+1),R(t+1),\ldots,R(t-t_R+2),D(t+1),\ldots,D(t-t_D+2)\right) \quad \text{式 3-8}$$

ここで、H：水位、R：雨量、D：ダム放流量、t：時間である。

表3-46　過去参照時間

水位観測所	t_H	t_R	t_D
松田	1	8	3
新甘柿橋	1	7	-
平山三保ダム	1	7	3

解析では6時間先までの実績雨量/ダム放流量を用い6時間先までの水位を予測した。表3-47に時刻tの実績水位$H(t)$を初期値とし、1時刻先の$H(t+1)$の水位を予測する場合の入出力データを示す。$H(t+6)$を計算するためには、これを6ステップ繰り返す。ただし、$H(t+2)$から$H(t+5)$は各ステップの計算値が入る。

表3-47　水位予測計算の入出力データ

時刻	水位	ダム放流量	レーダ雨量
t-t_R+2		・・・	$R(t-t_R+2)$
・・・	・・・	・・・	・・・
t-t_D+2	・・・	$D(t-t_D+2)$	・・・
・・・	・・・	・・・	・・・
t-t_H+1	$H(t-t_H+1)$		
・・・	・・・	・・・	・・・
t	$H(t)$	$D(t)$	$R(t)$
t+1	$H_p(t+1)$	D(t+1)	$R(t+1)$

入力に用いた雨量メッシュを図 3-142～図 3-144 に示す。メッシュサイズは 2.5km で、太線領域は各水位予測モデルの境界条件として使用した雨量メッシュである。太線領域の北西端を起点として東方向に向かってメッシュ番号を 1 から付与し、東端まで到達したら 1 メッシュ南の西端から継続して番号を付与した。

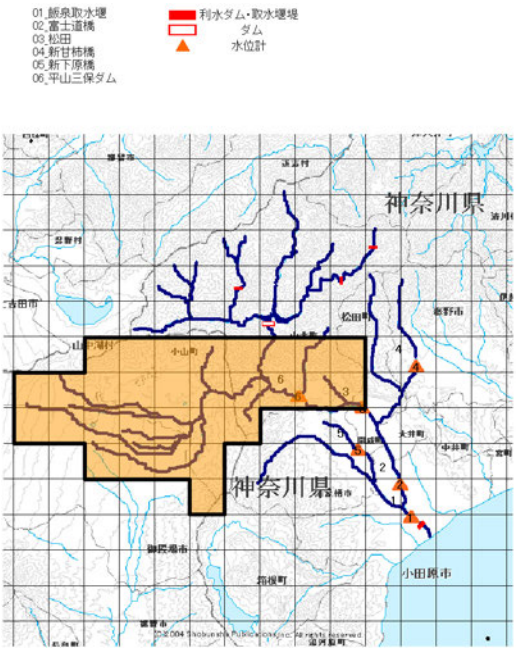


図 3-142　松田水位（39 メッシュ）

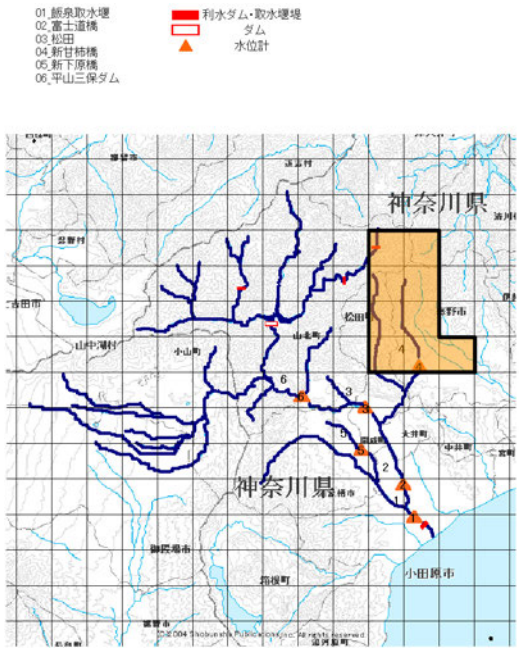


図 3-143　新甘柿橋水位（9 メッシュ）

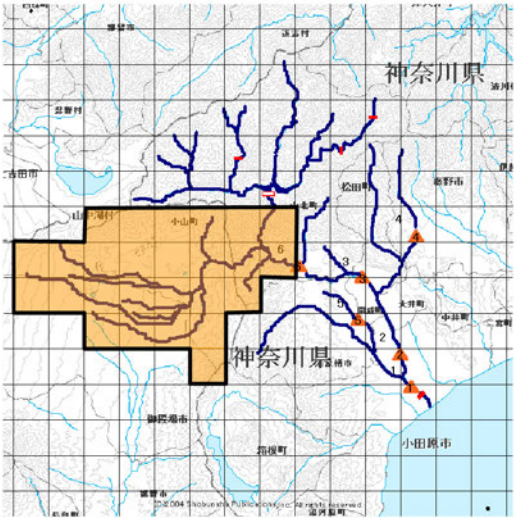


図 3-144　平山三保ダム水位（26 メッシュ）

3.4.2. 学習トレース結果

学習が十分に行われたかを確認するため、学習に用いたデータを用いて水位予測計算を実施した。各観測所における平均雨量モデルの結果とメッシュ雨量モデルの結果を図 3-145～図 3-150 に示す。

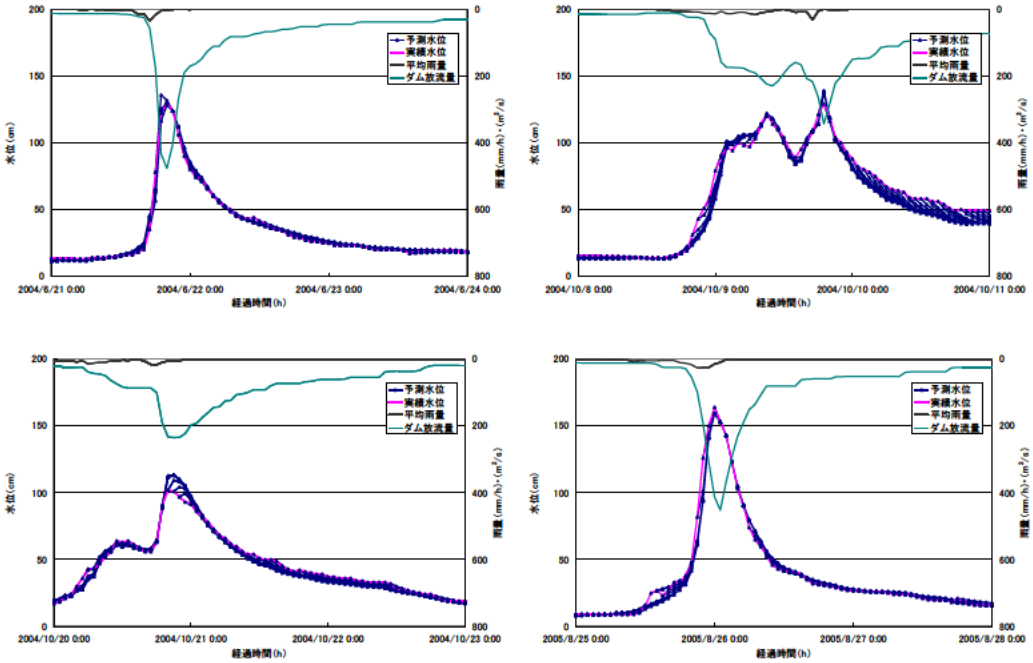


図 3-145　松田水位　学習トレース結果（平均雨量）

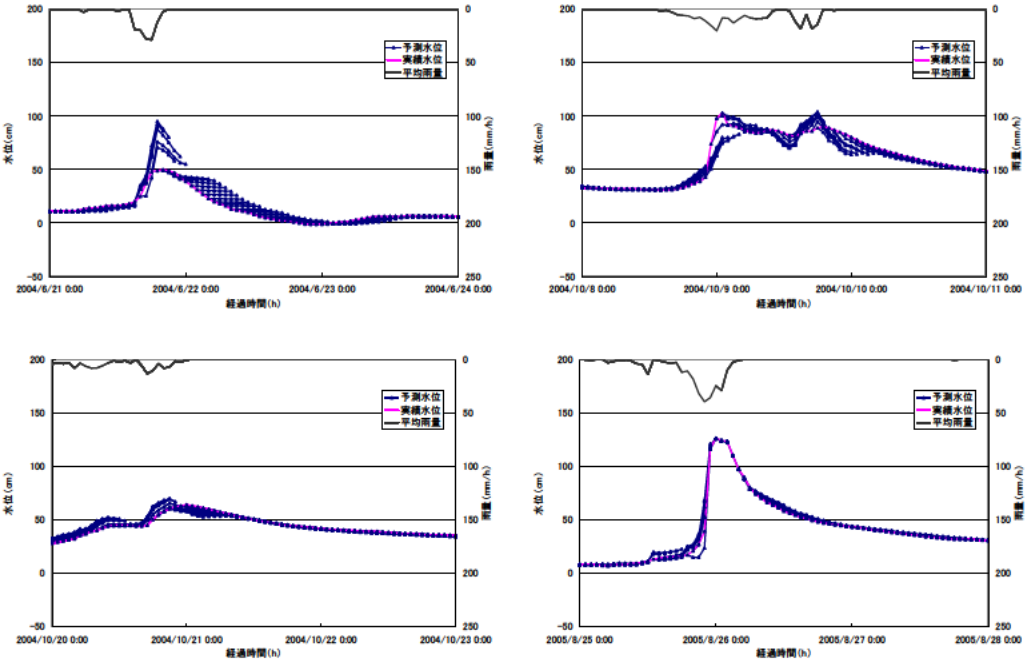


図 3-146　新甘柿橋水位　学習トレース結果（平均雨量）

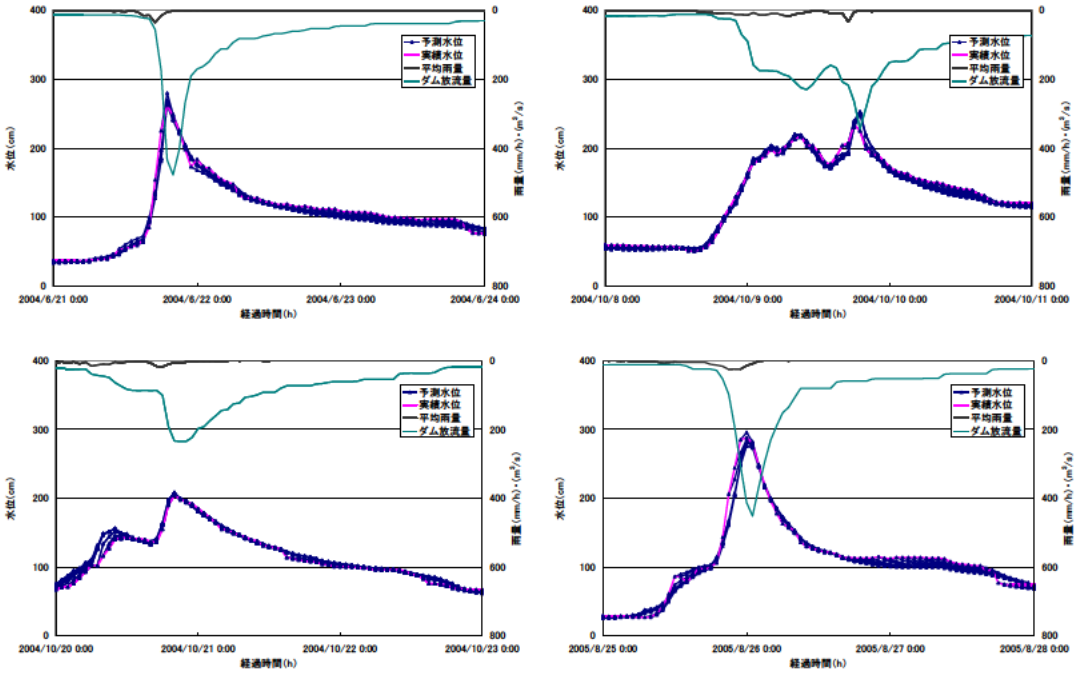


図 3-147　平山三保ダム水位　学習トレース結果（平均雨量）

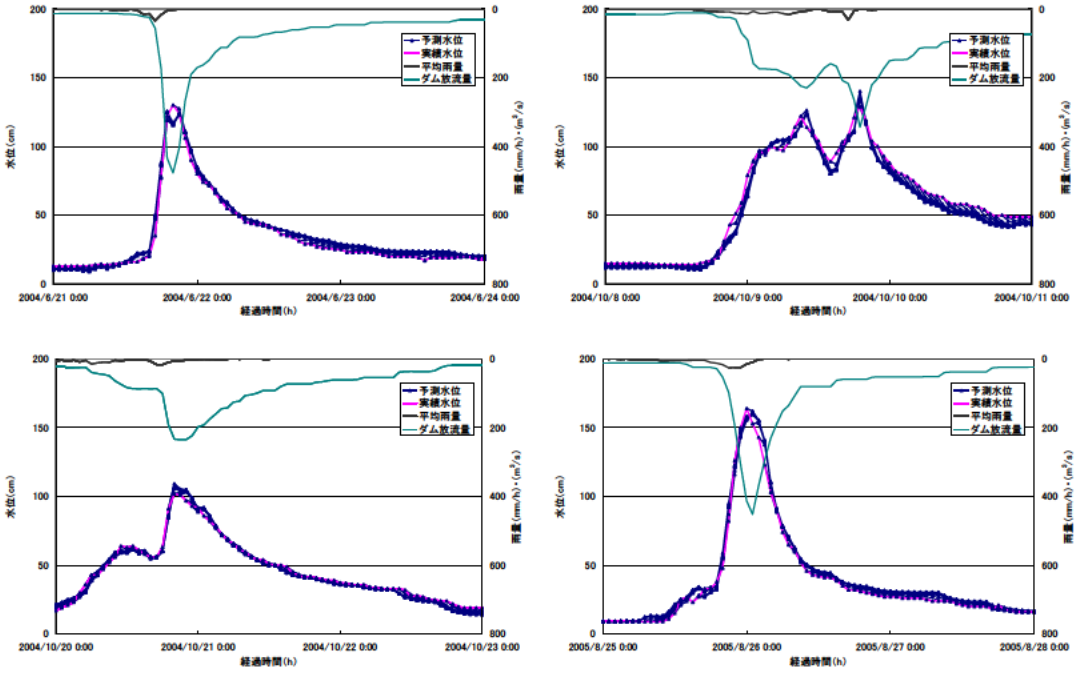


図 3-148　松田水位　学習トレース結果（メッシュ雨量）

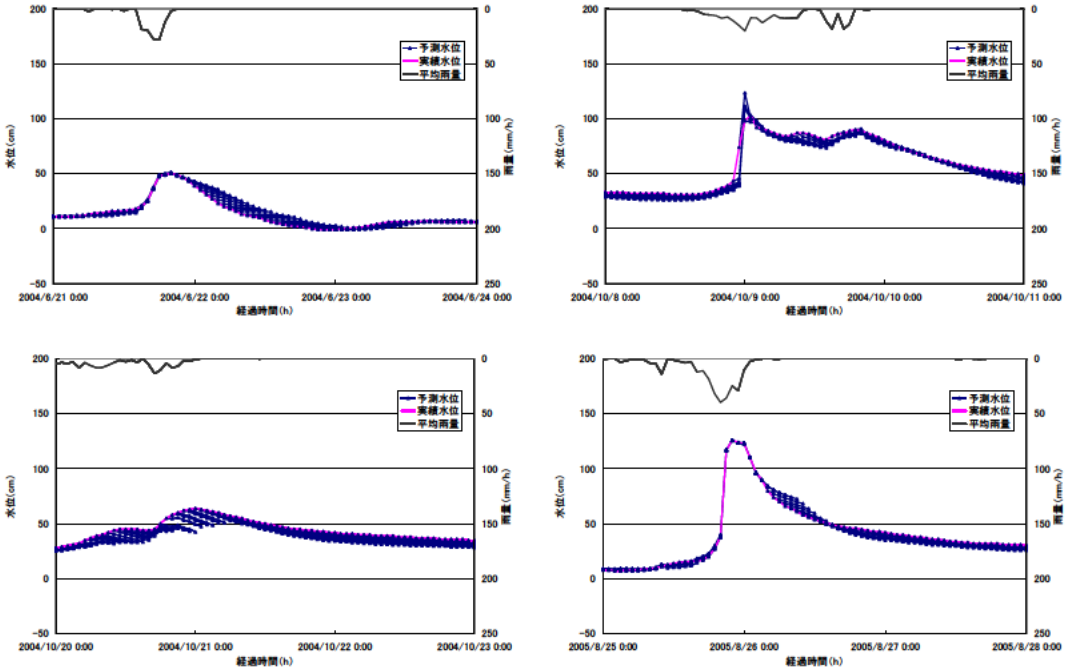


図 3-149　新甘柿橋水位　学習トレース結果（メッシュ雨量）

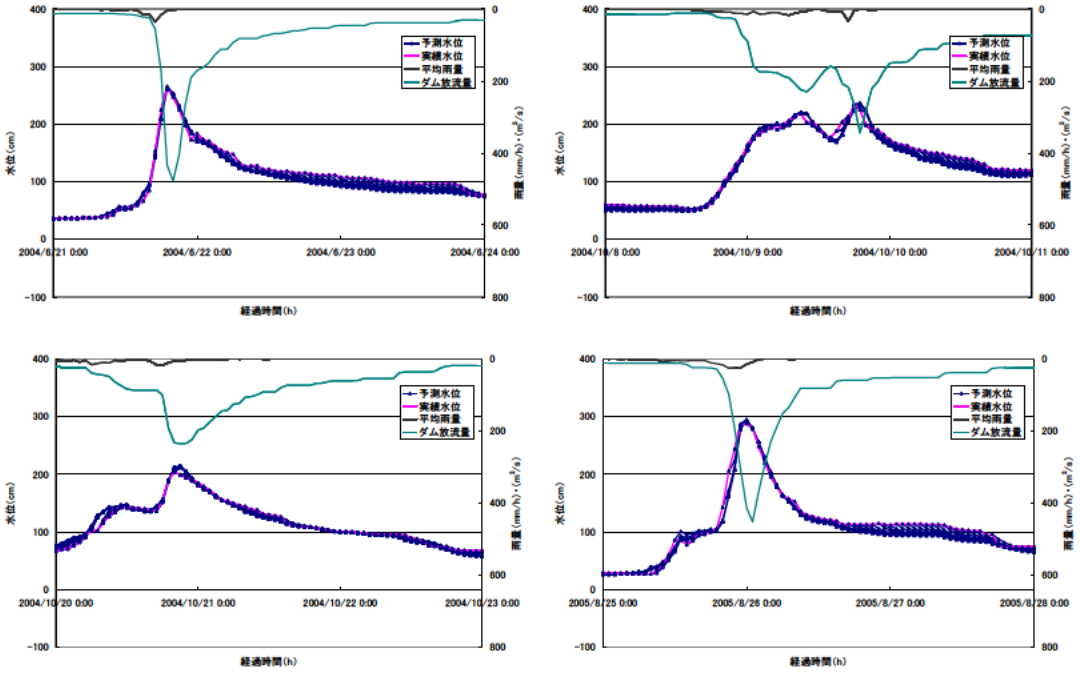


図 3-150　平山三保ダム水位　学習トレース結果（メッシュ雨量）

3.4.3. 未知データの予測結果

次にモデルにとっては未知となるデータを用いてモデルの予測計算を実施した。各観測所における平均雨量モデルの結果とメッシュ雨量モデルの結果を図 3-151～図 3-156 に示す。

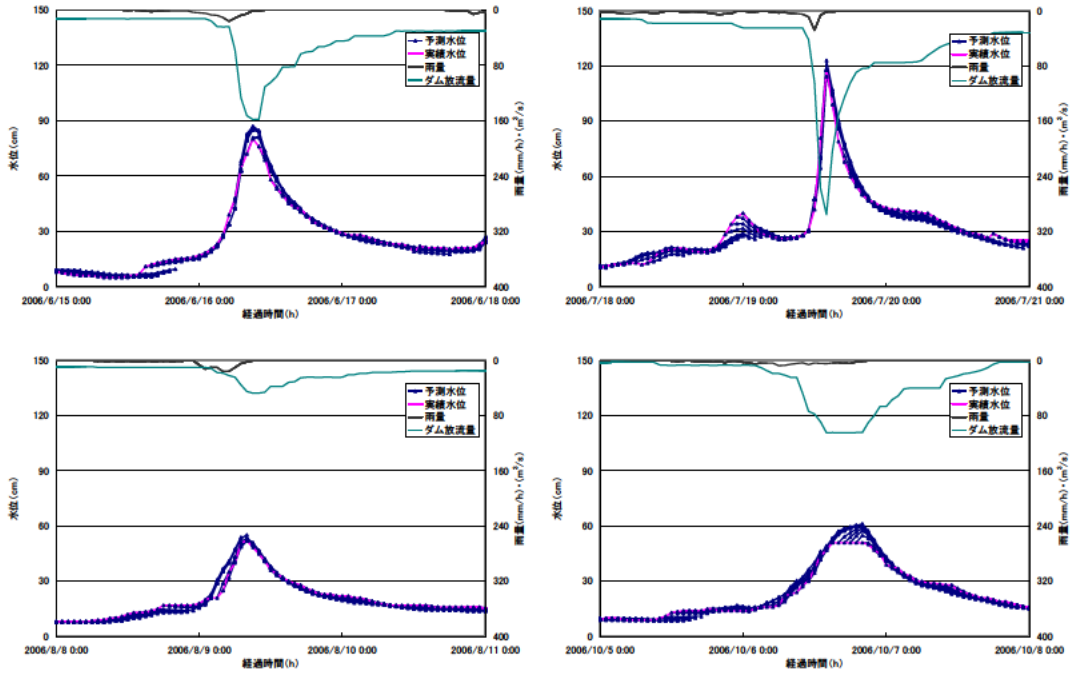


図 3-151　松田水位　未知予測結果（平均雨量）

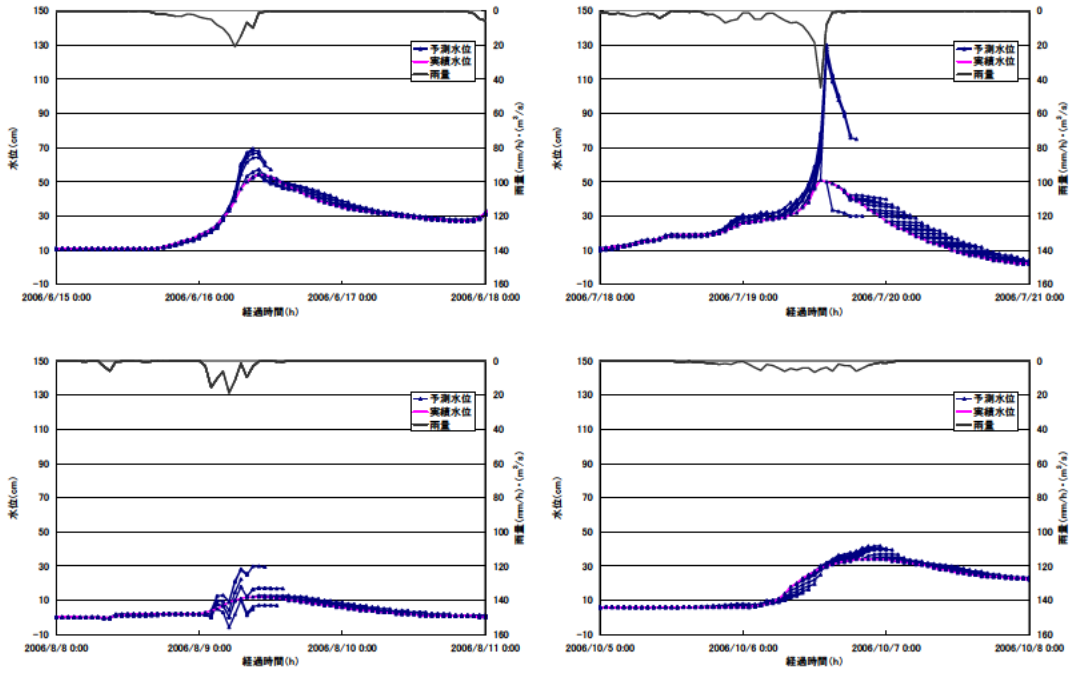


図 3-152　新甘柿橋水位　未知予測結果（平均雨量）

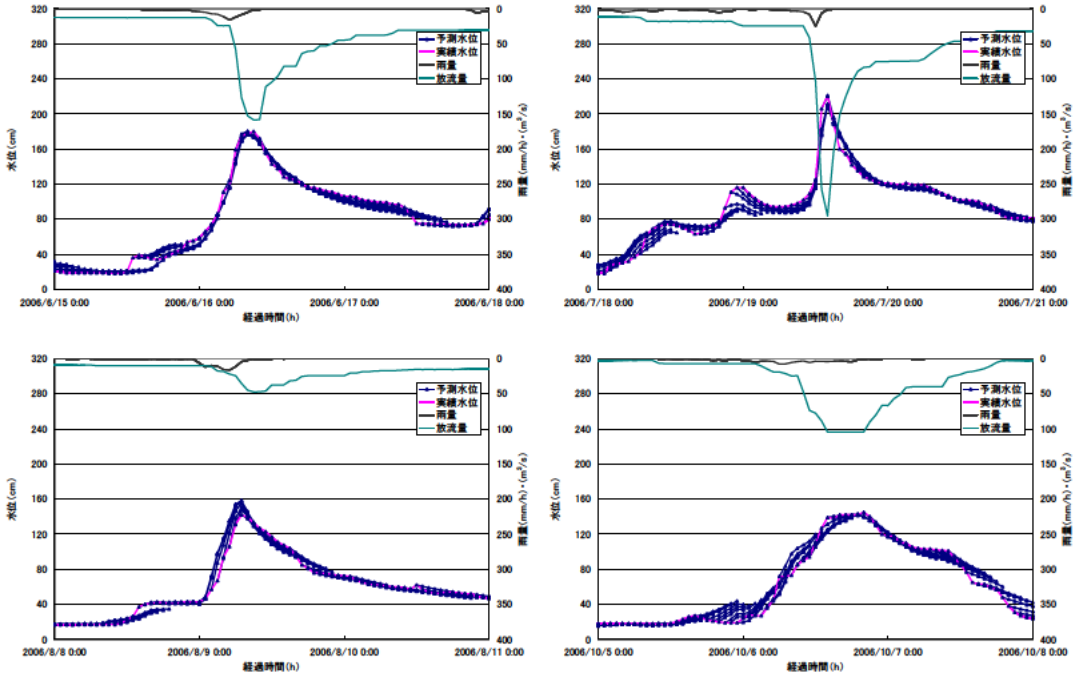


図 3-153　平山三保ダム　未知水位予測結果（平均雨量）

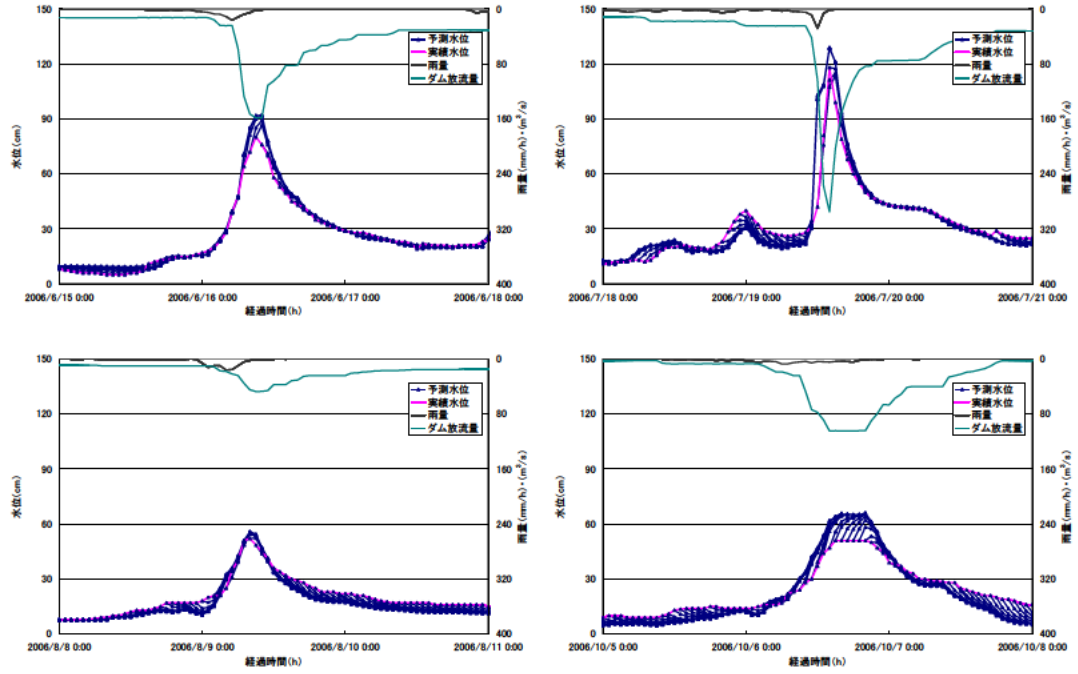


図 3-154　松田水位　未知予測結果（メッシュ雨量）

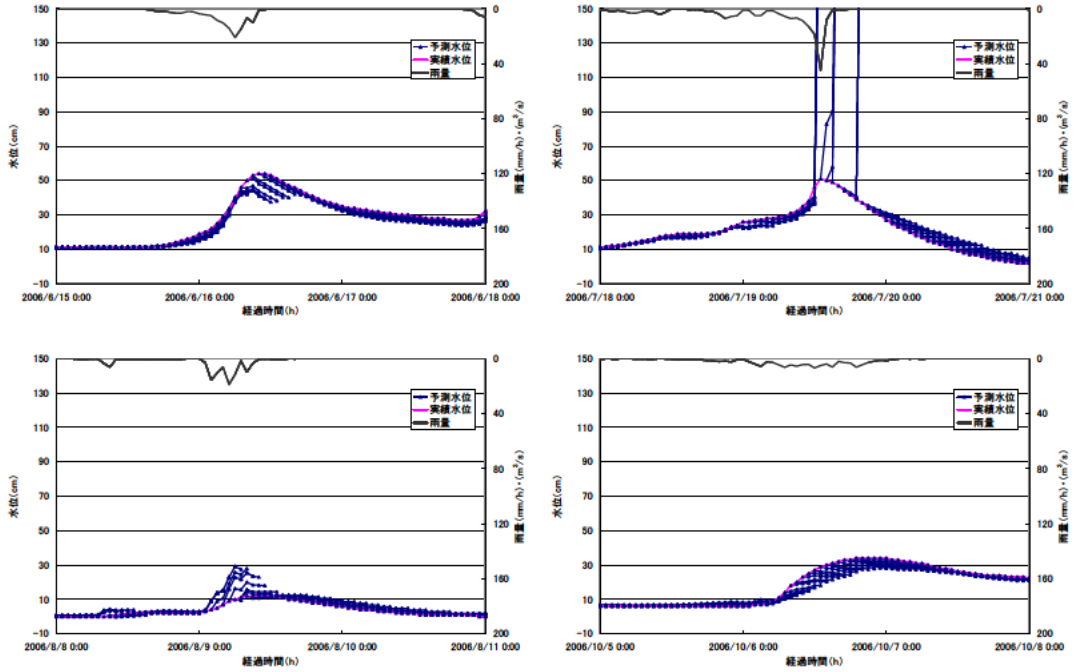


図 3-155　新甘柿橋水位　未知予測結果（メッシュ雨量）

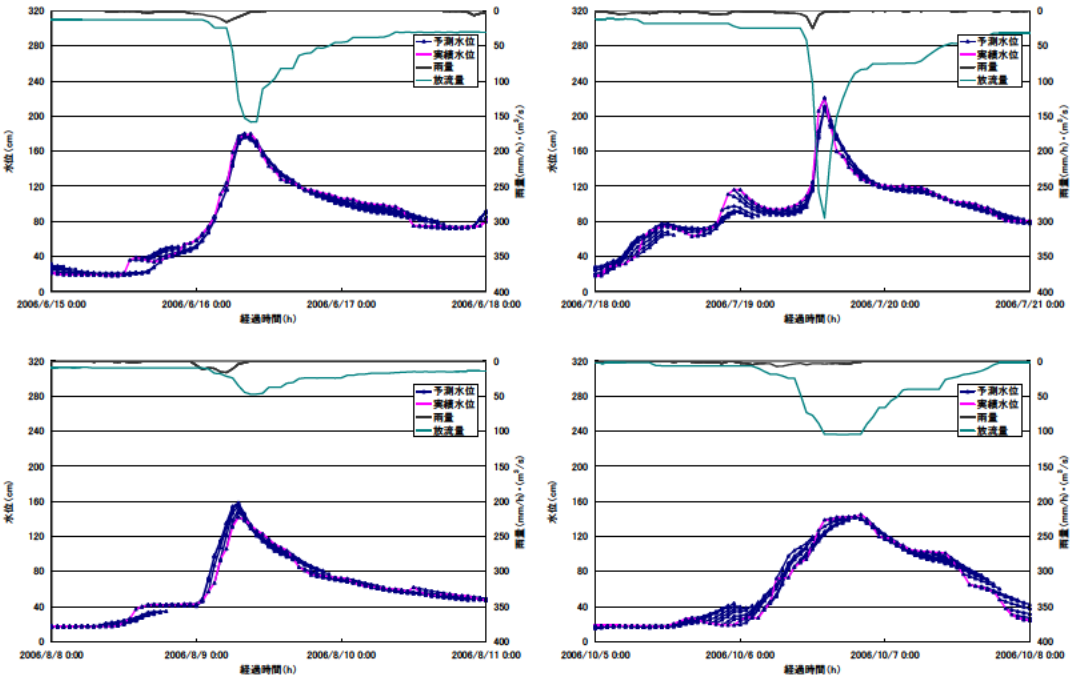


図 3-156　平山三保ダム水位　未知予測結果（メッシュ雨量）

3.4.4. 水位レベル別精度評価

学習トレースと未知データの予測について、それぞれ平均誤差と RMSE を調べた結果を図 3-157～図 3-159 に示す。各グラフは、メッシュ雨量と平均雨量に対する水位の高さ毎の予測先行時間と予測誤差の関係を示している。水位の高さは、低水位（レベル１）を最低水位から豊水位まで、中水位（レベル２）を豊水位から４番目に大きいピーク水位まで、高水位（レベル３）を４番目に大きいピーク水位から最大水位までの 3 段階に分類した。表 3-48 に水位観測所ごとの水位範囲を示す。

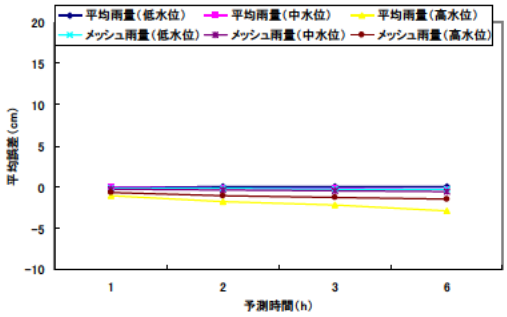
図 3-158 に示した新甘柿橋の結果によると、高水位における予測誤差が大きくなっていることが分かる。これは、

図 3-152 と図 3-155 に示した 2006 年 7 月 19 日の未知データの予測で大きな誤差が生じているためであり、原因として出水時に人為的な水位操作が行われたことが考えられる。図 3-146 と図 3-149 に示した 2005 年 8 月 26 日の出水では 39.6mm の降雨で水位が 126cm まで上昇しているが、

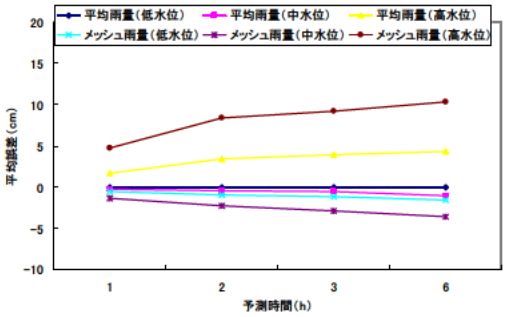
図 3-152 と図 3-155 に示した 2006 年 7 月 19 日の出水では 44.9mm/h の降雨で水位が 54cm までしか上昇していない。新甘柿橋のモデルは雨量のみを境界条件として構築しているため、人為操作の影響は予測に反映できないが、堰や水門操作などの水位に影響を及ぼす因子をモデルに追加することで精度を向上できる可能性はある。

表 3-48　評価対象の水位範囲

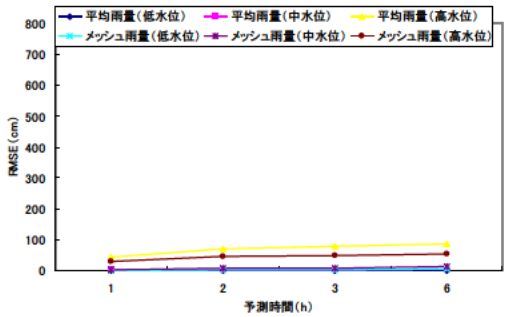
水位観測所	水位レベル	最小値	最大値
松田	低水位（レベル１）	—∞	10.99
	中水位（レベル２）	10.99	52
	高水位（レベル３）	52	∞
新甘柿	低水位（レベル１）	—∞	13.99
	中水位（レベル２）	13.99	41
	高水位（レベル３）	41	∞
平山三保ダム	低水位（レベル１）	—∞	23.99
	中水位（レベル２）	23.99	145
	高水位（レベル３）	145	∞



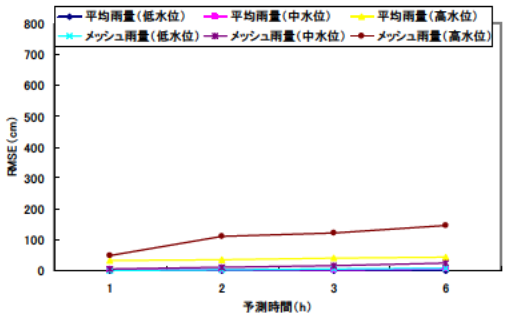
（a）学習トレースの平均誤差



（b）未知予測の平均誤差

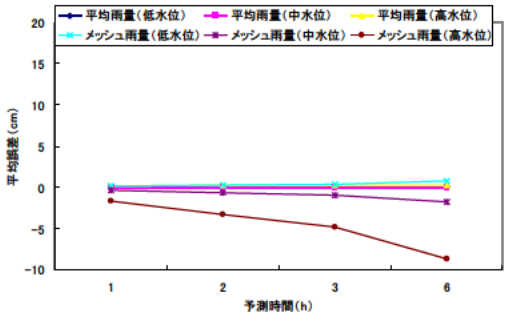


（c）学習トレースの RMSE

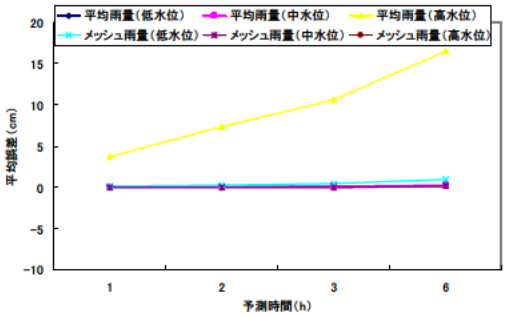


（d）未知予測の RMSE

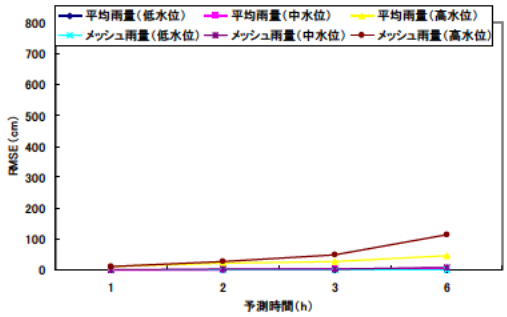
図 3-157　松田水位　雨量別・予測時間別の精度評価



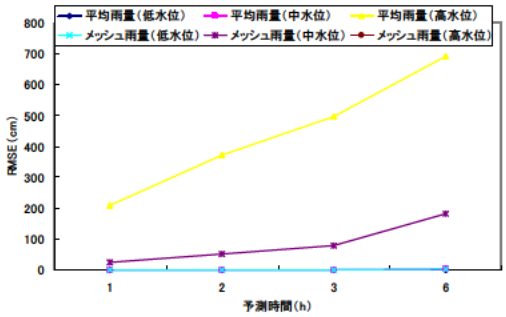
（a）学習トレースの平均誤差



（b）未知予測の平均誤差

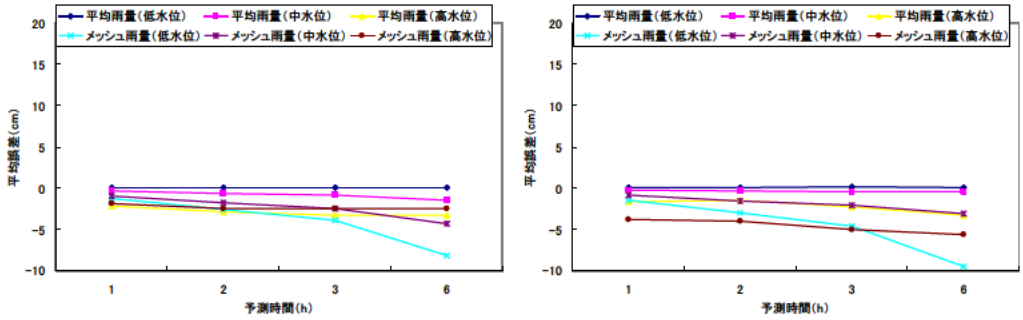


（c）学習トレースの RMSE

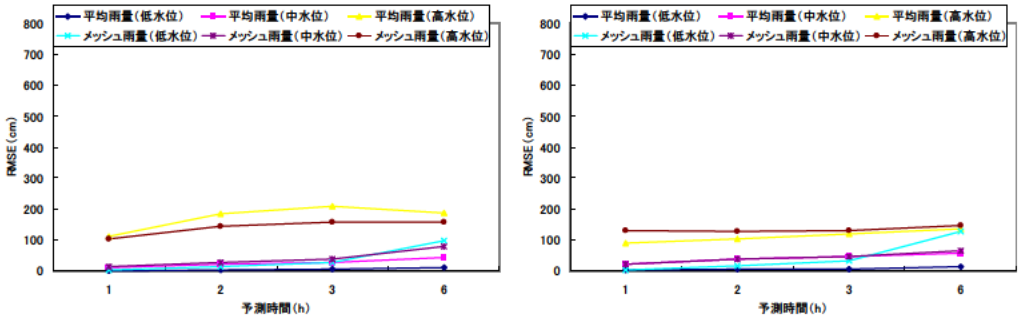


（d）未知予測の RMSE

図 3-158　新甘柿橋水位　雨量別・予測時間別の精度評価



（a）学習トレースの平均誤差　　（b）未知予測の平均誤差



（c）学習トレースの RMSE　　（d）未知予測の RMSE

図 3-159　平山三保ダム水位　雨量別・予測時間別の精度評価

図 3-157～図 3-159 を基に、6 時間先予測を対象としてメッシュ雨量よりも平均雨量を用いたほうが RMSE が小さくなるケースを表 3-49 にまとめた。学習トレースでは高水位を除き平均雨量モデルの方が誤差は小さくなり、未知データの予測では全ての水位レベルで平均雨量モデルの誤差が小さくなっていることが分かる。

表 3-49　メッシュ雨量に対して平均雨量の RMSE が小さくなるケース

	学習トレース				未知予測			
	全体	低水位	中水位	高水位	全体	低水位	中水位	高水位
松田	○	○	○		○	○	○	○
新甘柿橋	○	○	○	○	○	○	○	○
平山三保ダム	○	○	○		○	○	○	○
計	3 (100%)	3 (100%)	3 (100%)	1 (33%)	3 (100%)	3 (100%)	3 (100%)	3 (100%)

3.4.5. 出水ピーク・立上り・立下り精度評価

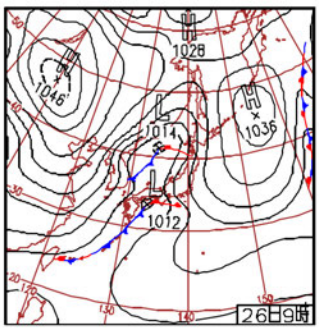
未知データの中で規模の大きな出水１０イベントを抽出し、水位ピーク誤差の精度評価を行った。評価対象とした出水ピークの日時を表 3-50 に示す。イベント No.はピーク水位の大きい順に割り当てている。

（1）ピーク評価

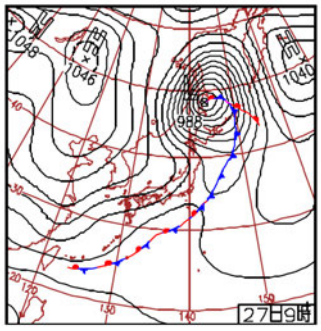
各水位観測所のピーク精度評価結果を図 3-161～図 3-163、表 3-51～表 3-53 に示す。人為操作が含まれている新甘柿橋の一部の出水を除き、予測誤差は±50cm 以内に収まっていることが分かる。

表 3-50　各水位観測所の出水ピーク日時

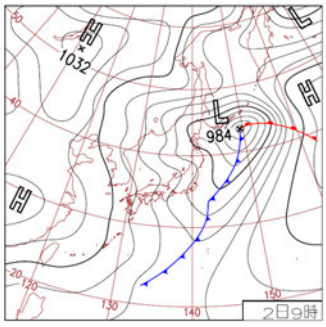
	松田	気象概況	新甘柿橋	気象概況	平山三保ダム	気象概況
No.1	2006/7/19 14:00	梅雨前線	2006/6/16 11:00	梅雨前線	2006/7/19 14:00	梅雨前線
No.2	2006/6/16 9:00	梅雨前線	2006/7/19 13:00	梅雨前線	2006/6/16 9:00	梅雨前線
No.3	2006/12/27 3:00	低気圧	2006/12/27 3:00	低気圧	2006/12/27 2:00	低気圧
No.4	2006/8/9 8:00	台風第 7 号	2006/4/12 6:00	前線	2006/10/6 20:00	秋雨前線
No.5	2006/10/6 20:00	秋雨前線	2006/10/7 0:00	秋雨前線	2006/8/9 7:00	台風第 7 号
No.6	2006/4/12 5:00	前線	2006/11/27 7:00	前線/低気圧	2006/4/12 5:00	前線
No.7	2006/3/17 0:00	前線/低気圧	2006/7/5 22:00	梅雨前線	2006/2/26 18:00	前線/低気圧
No.8	2006/7/5 18:00	梅雨前線	2006/3/2 5:00	前線/低気圧	2006/3/17 0:00	前線/低気圧
No.9	2006/2/26 19:00	前線/低気圧	2006/2/27 0:00	前線/低気圧	2006/7/5 17:00	梅雨前線
No.10	2006/8/17 12:00	台風第 10 号	2006/8/9 12:00	台風第 7 号	2006/8/17 11:00	台風第 10 号



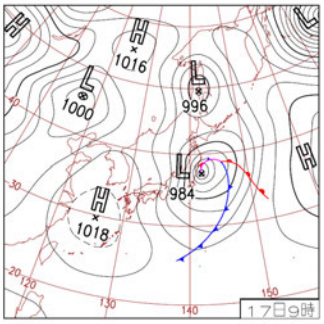
2006/2/26

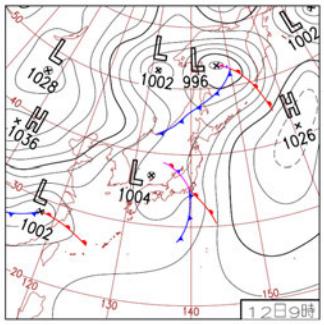


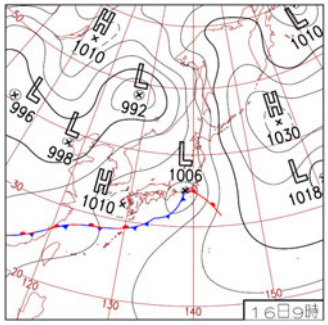
2006/2/27



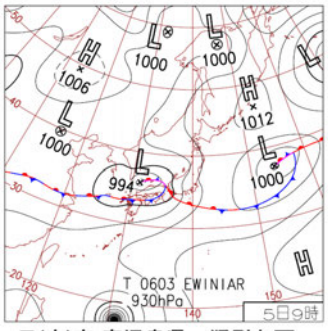
2006/3/2



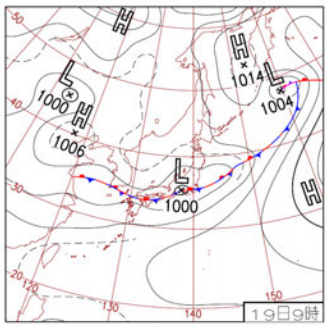




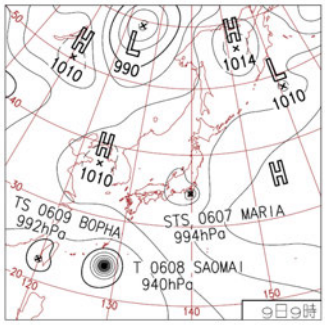
2006/3/17



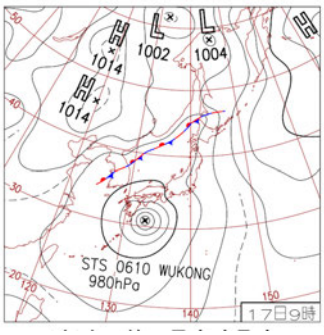
2006/4/12



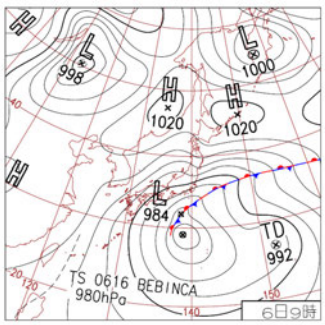
2006/6/16



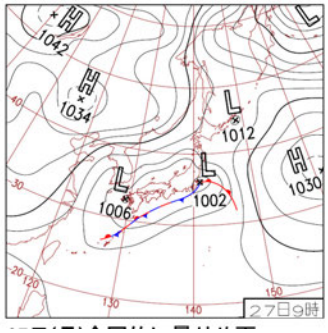
2006/7/5



2006/7/19



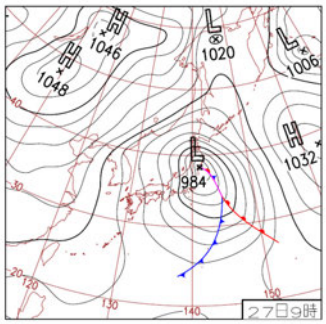
2006/8/9



2006/8/17

2006/10/7

2006/11/27



2006/12/27

図 3-160　出水ピーク日の天気図

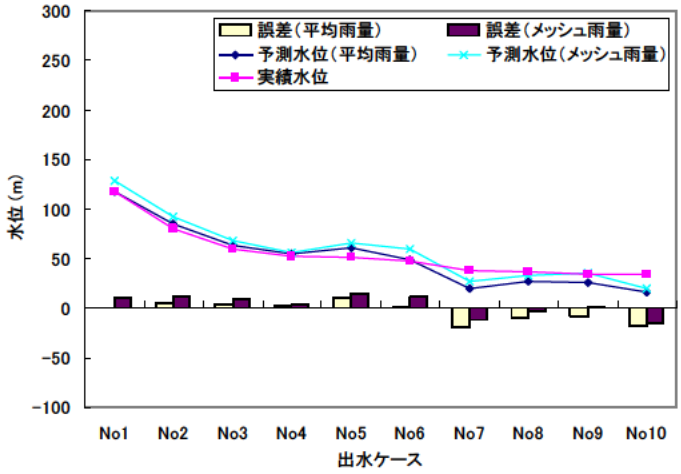


図 3-161　松田水位　ピーク精度評価

表 3-51　松田水位　ピーク精度評価

	平均雨量			メッシュ雨量		
	予測水位	実績水位	誤差	予測水位	実績水位	誤差
No1	117.7006	118	-0.29935	128.5563	118	10.55633
No2	85.03343	80	5.033433	91.57585	80	11.57585
No3	63.12107	59	4.121074	68.1535	59	9.153503
No4	55.10253	52	3.102526	55.70671	52	3.706705
No5	61.13024	51	10.13024	66.07995	51	15.07995
No6	49.06308	48	1.063078	59.0921	48	11.0921
No7	19.15674	38	-18.8433	26.77532	38	-11.2247
No8	26.59734	36	-9.40266	33.08066	36	-2.91934
No9	26.27748	34	-7.72252	35.56601	34	1.566006
No10	16.17236	34	-17.8276	19.12644	34	-14.8736
RMSE			9.882948			10.25472

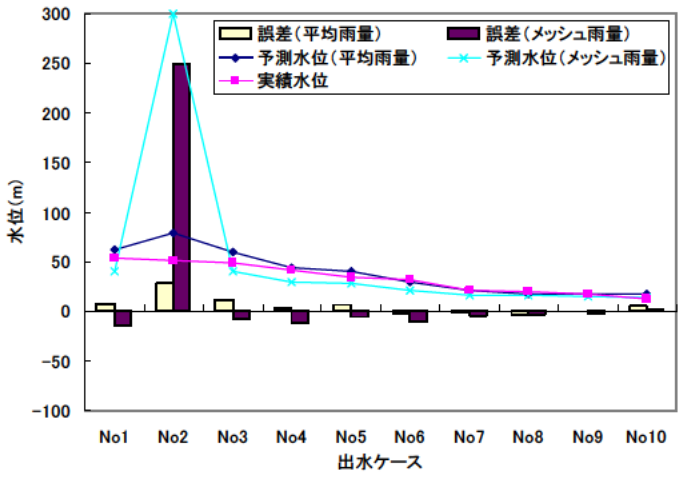


図 3-162　新甘柿橋水位　ピーク精度評価

表 3-52　新甘柿橋水位　ピーク精度評価

	平均雨量			メッシュ雨量		
	予測水位	実績水位	誤差	予測水位	実績水位	誤差
No1	61.59289	54	7.592891	39.84692	54	-14.1531
No2	78.55437	51	27.55437	300	51	249
No3	60.11366	49	11.11366	40.25219	49	-8.74781
No4	43.2132	41	2.213196	29.23535	41	-11.7646
No5	40.4088	34	6.408798	28.10929	34	-5.89071
No6	29.56293	32	-2.43707	21.4279	32	-10.5721
No7	20.27149	21	-0.72851	16.11148	21	-4.88852
No8	17.12045	20	-2.87955	16.33905	20	-3.66095
No9	17.12507	17	0.125065	14.28795	17	-2.71205
No10	17.11592	12	5.115916	13.25537	12	1.255369
RMSE			10.13573			79.12581

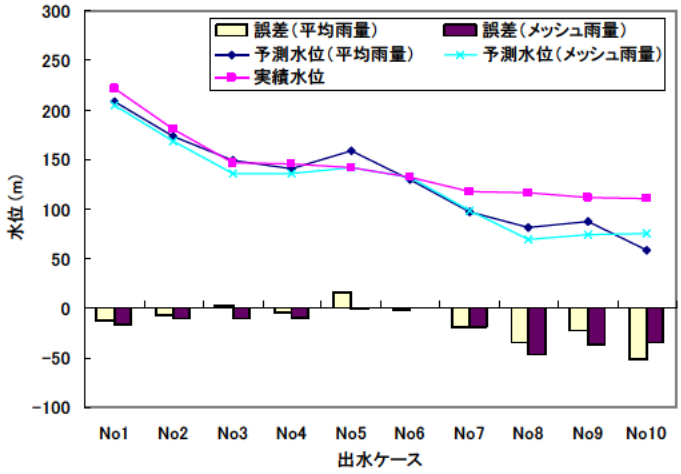


図 3-163　平山三保ダム水位　ピーク精度評価

表 3-53　平山三保ダム水位　ピーク精度評価

	平均雨量			メッシュ雨量		
	予測水位	実績水位	誤差	予測水位	実績水位	誤差
No1	208.3953	221	-12.6047	204.3999	221	-16.6001
No2	173.2434	180	-6.75665	168.8651	180	-11.1349
No3	149.0665	146	3.066532	135.9033	146	-10.0967
No4	140.1256	145	-4.87442	135.2112	145	-9.7888
No5	158.3932	142	16.3932	141.1352	142	-0.86478
No6	130.0975	132	-1.90248	132.0455	132	0.045534
No7	97.36987	117	-19.6301	97.77336	117	-19.2266
No8	81.33601	116	-34.664	68.79833	116	-47.2017
No9	87.78801	111	-23.212	74.05321	111	-36.9468
No10	57.87701	110	-52.123	75.29631	110	-34.7037
RMSE			23.13566			24.0107

平均雨量とメッシュ雨量の違いを比較するため、各出水イベントについてメッシュ雨量よりも平均雨量を用いた方が予測誤差が小さくなるケースを調査した結果を表 3-54 に示す。いずれの観測所においてもメッシュ雨量より平均雨量を用いた方が誤差が小さくなる割合が高いことが分かる。

表 3-54　メッシュ雨量モデルに対して平均雨量モデルの立上り・立下り誤差が小さくなるケース
（観測所名の括弧は雨量メッシュ数）

	小　←　流域面積　→　大		
	新甘柿橋 (9)	平山三保ダム (26)	松田 (30)
No.1	○	○	○
No.2	○	○	○
No.3		○	○
No.4	○	○	○
No.5			○
No.6	○		○
No.7	○		
No.8	○	○	
No.9	○	○	
No.10			
計	7 (70%)	6 (60%)	6 (60%)

次に、平均雨量とメッシュ雨量のピーク予測誤差の平均値を図 3-164 に示す。新甘柿橋では人為操作の影響でメッシュ雨量の誤差が大きくなったが、それ以外の観測ポイントでは、メッシュ雨量と平均雨量の顕著な差は見られなかった。

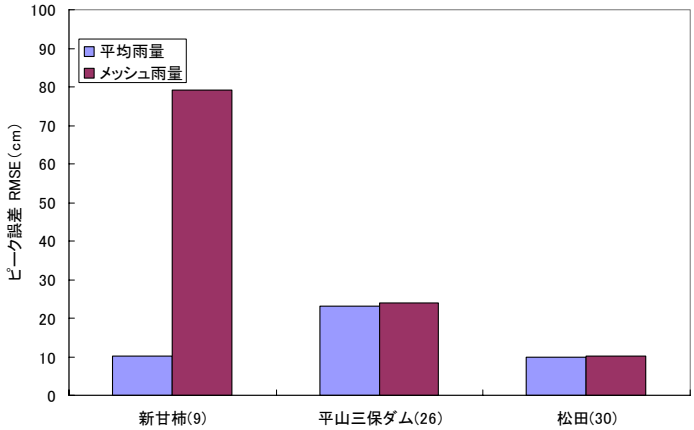


図 3-164　TOP10 出水のピーク誤差比較

（2）立上り・立下り評価

各水位観測所の立上りと立下りの精度評価結果を図 3-165～図 3-170、表 3-55～表 3-57 に示す。新甘柿の以上データを除く全ての観測所において±30m 以内の誤差に収まっていることが分かる。

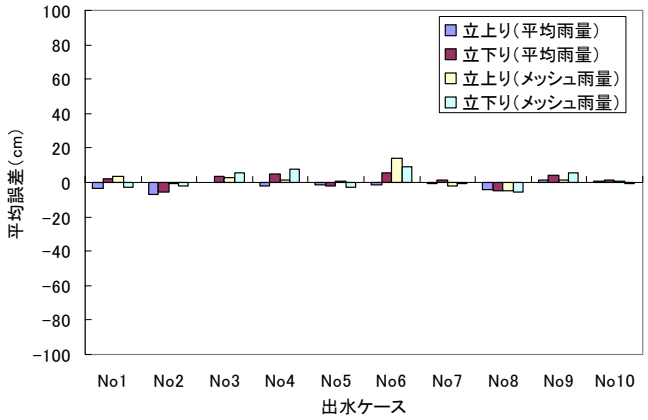


図 3-165　松田水位　立上り・立下り精度評価（平均誤差）

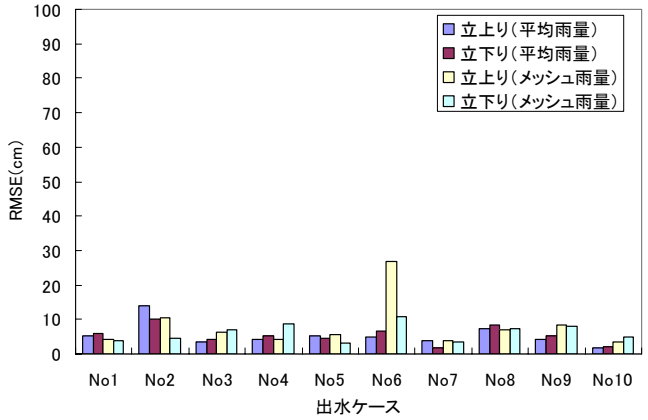


図 3-166　松田水位　立上り・立下り精度評価（RMSE）

表 3-55　松田水位　立上り・立下り精度評価

	平均雨量				メッシュ雨量			
	平均誤差		RMSE		平均誤差		RMSE	
	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り
No.1	-3.44738	2.376619	5.171839	6.079726	3.255865	-2.66875	4.250981	3.904712
No.2	-6.91126	-5.91626	13.78906	9.934328	-0.86199	-2.19415	10.39849	4.560495
No.3	0.14257	3.828898	3.439414	4.25814	2.606904	5.845899	6.139878	7.038812
No.4	-2.06646	4.915316	4.114506	5.299644	1.338717	7.822465	4.267586	8.835713
No.5	-1.47529	-2.36899	5.353434	4.538357	0.458047	-2.97988	5.40434	3.080037
No.6	-1.14284	5.696224	5.02589	6.635987	13.79062	8.815803	26.89583	10.8734
No.7	-0.55221	1.294795	3.961326	1.653383	-2.30534	-0.39978	3.794454	3.624432
No.8	-4.45227	-5.15509	7.465206	8.306007	-5.08408	-5.28994	6.949306	7.432099
No.9	1.516715	3.945016	4.281663	5.262229	1.671982	5.562463	8.223139	7.86202
No.10	0.57861	1.465609	1.652346	2.001634	0.862595	-0.77321	3.486415	4.908731

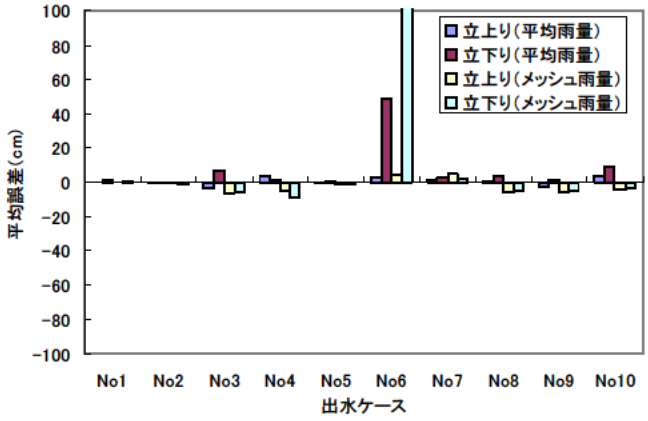


図 3-167　新甘柿橋水位　立上り・立下り精度評価（平均誤差）

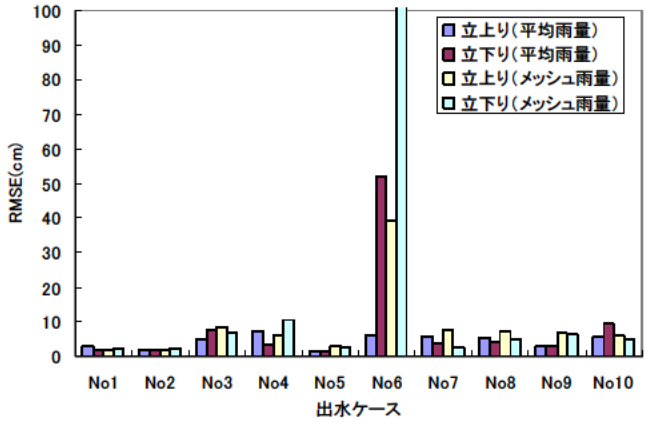


図 3-168　新甘柿橋水位　立上り・立下り精度評価（RMSE）

表 3-56　新甘柿橋水位　立上り・立下り精度評価

	平均雨量				メッシュ雨量			
	平均誤差		RMSE		平均誤差		RMSE	
	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り
No.1	0.027197	1.140302	2.739161	1.826649	0.265082	0.563716	1.691731	1.989931
No.2	-0.50912	-0.58635	1.803845	1.716417	-0.57881	-1.35126	1.76573	1.965349
No.3	-3.21897	7.158348	5.028726	7.525205	-6.35792	-5.43417	8.363281	6.598004
No.4	3.316119	1.408596	7.453869	3.584515	-4.65431	-9.17406	5.991476	10.32519
No.5	-0.54897	0.70998	1.236307	1.30274	-1.43809	-1.1435	2.713271	2.288364
No.6	3.006035	48.95036	5.959914	51.8169	4.325121	254	39.46989	254.0337
No.7	1.265626	2.560372	5.530977	3.921709	5.071389	2.353097	7.682688	2.599708
No.8	0.604922	3.601159	5.166814	4.096565	-5.86746	-4.72357	7.217083	4.788289
No.9	-2.48205	1.534847	2.674363	2.844608	-5.56496	-5.16529	6.492574	6.401955
No.10	3.752115	9.185124	5.544537	9.445924	-4.52949	-3.58817	5.864101	4.916083

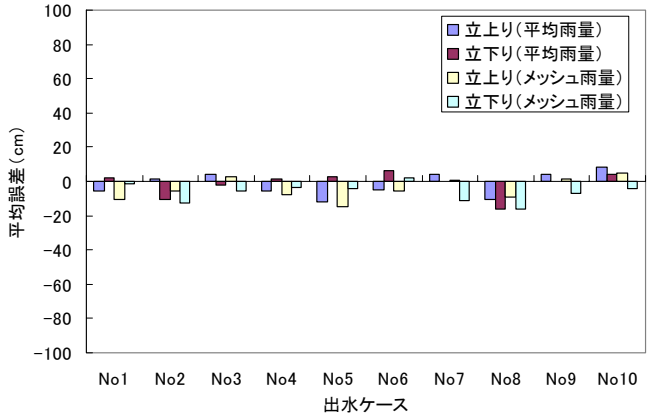


図 3-169　平山三保ダム水位　立上り・立下り精度評価（平均誤差）

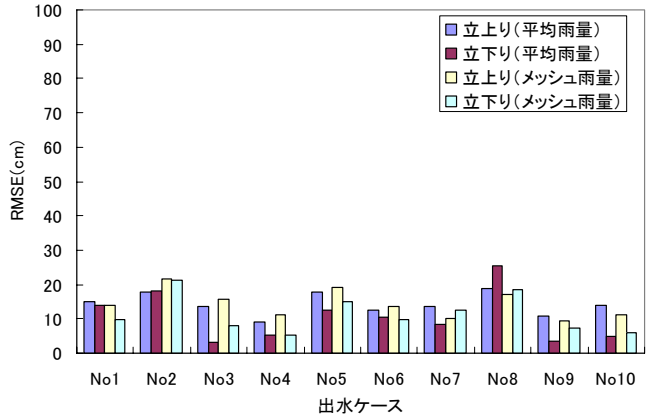


図 3-170　平山三保ダム水位　立上り・立下り精度評価（RMSE）

表 3-57　平山三保ダム水位　立上り・立下り精度評価

	平均雨量				メッシュ雨量			
	平均誤差		RMSE		平均誤差		RMSE	
	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り
No.1	-5.30461	1.848558	14.91303	13.8513	-10.6152	-1.70135	13.96962	9.790921
No.2	1.694875	-10.7584	17.80881	18.12565	-5.3419	-12.9128	21.4934	21.16386
No.3	4.35093	-1.91024	13.63352	3.030736	2.634914	-5.40212	15.57189	7.901177
No.4	-5.52226	1.304736	9.182085	5.17944	-7.4267	-3.79148	11.1853	5.155663
No.5	-12.0438	2.897157	17.62756	12.58244	-14.8249	-3.9681	19.14606	14.95318
No.6	-5.18988	5.991803	12.65441	10.33424	-5.70602	1.748581	13.42062	9.710966
No.7	3.896375	-0.21376	13.49577	8.386704	0.503129	-10.9888	9.999269	12.62541
No.8	-10.7548	-16.36	18.94537	25.36833	-9.0217	-15.9362	16.91074	18.42784
No.9	4.272633	0.124508	10.77877	3.595218	1.471218	-6.65629	9.28647	7.258334
No.10	8.616032	4.530046	13.96887	5.041547	4.767827	-4.0786	11.31927	5.789044

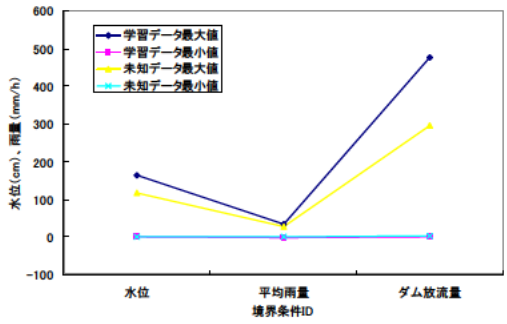
平均雨量とメッシュ雨量の違いを比較するため、各出水イベントについてメッシュ雨量よりも平均雨量を用いた方が予測誤差が小さくなるケースを調査した結果を表 3-58 にまとめた。メッシュ雨量より平均雨量を用いた方が誤差が小さくなる割合が比較的高いことが分かる。

表 3-58　メッシュ雨量モデルに対して平均雨量モデルの立上り・立下り誤差が小さくなるケース
（観測所名の括弧は雨量メッシュ数）

	小　←　流域面積　→　大					
	新甘柿橋 (9)		平山三保ダム (26)		松田 (30)	
ケース	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り
No.1		○				
No.2		○	○	○		
No.3	○		○	○	○	○
No.4		○	○		○	○
No.5	○	○	○	○	○	
No.6	○	○	○		○	○
No.7	○			○		○
No.8	○	○				
No.9	○	○		○	○	○
No.10	○			○	○	○
計	7 (70%)	7 (70%)	5 (50%)	6 (60%)	6 (60%)	6 (60%)

3.4.6. 学習データの範囲と未知データの範囲

学習データと未知データ計算に用いた水位、雨量、ダム放流量の最大/最小値を図 3-171～図 3-173 に示す。平均雨量モデルでは新甘柿の雨量を除く全ての観測所で未知データが学習データの範囲内に収まっているが、メッシュ雨量モデルでは全ての観測所で学習データの範囲を逸脱している。学習データが十分揃っている場合にはメッシュ雨量モデルを用いても安定した予測を行えると考えられるが、十分揃っていない場合には、新甘柿橋の一部の出水事例で示されたように、平均雨量モデルに比べて不安定性が増すと考えられる。



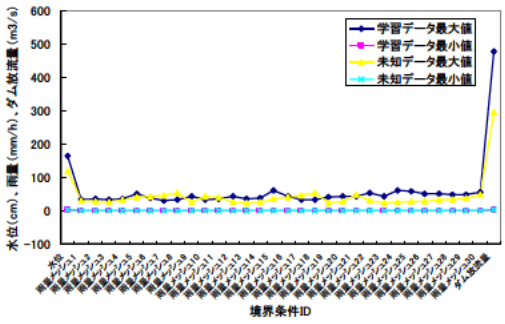


図 3-171　松田モデルの要素別データ範囲（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

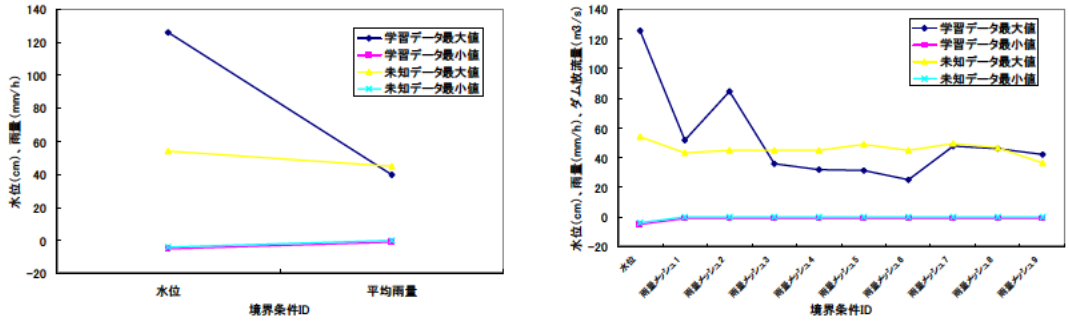


図 3-172　新甘柿橋モデルの要素別データ範囲（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

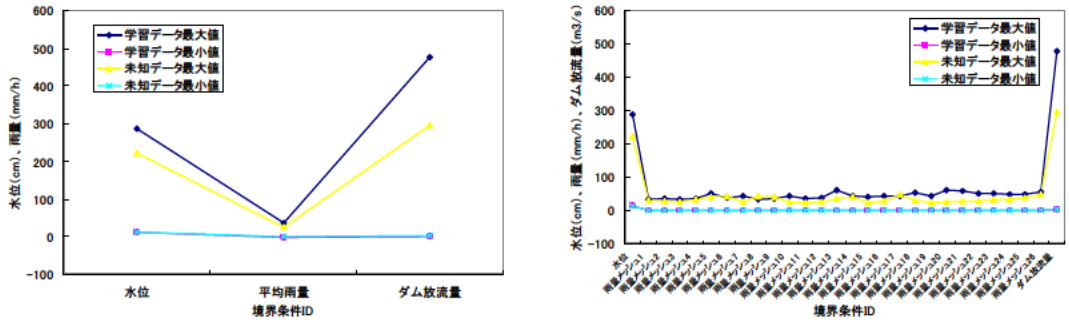


図 3-173　平山三保ダムモデルの要素別データ範囲（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

3.4.7. まとめ

酒匂川の事例では、2年分のデータを用いて新甘柿橋、平山三保ダム、松田の各水位予測モデルを構築し、それ以外の1年分のデータを用いて予測検証を実施した。本河川は、静岡県および神奈川県を流れる２級河川であり、中流には三保ダムが配置されている。本解析では、三保ダム下流の水位予測と上流にダムの無い地点の水位予測を実施した。水位の高さごとに予測先行時間と予測誤差の関係を検証した結果、予測先行時間が大きくなるほど予測誤差も大きくなるものの、一部の例外を除き RMSE 誤差が 20cm 以内に収まっており、実用上十分な予測精度であることを確認した。また、学習トレースと未知データ予測の精度比較を行った結果、学習トレースでは高水位を除き平均雨量を用いた方が高精度となり、未知データ予測では全ての水位レベルで平均雨量を用いた方が高精度となった。また未知データの中から 10 出水を抽出し、立上り・ピーク・立下りの精度評価を実施した結果では、平均雨量を用いた方が予測精度が高くなるケースが多いことを確認した。このことから、高水位では少なくとも平均雨量を用いた方が未知データに対する予測安定性が高くなることが分かる。本検証の結果では、適切な雨量データを入力することにより、実用上十分な精度の予測モデルを構築できることを確認した。本手法の適用により、ダム設備を有する全国の河川流域や、ダムを含まない河川流域において高精度な水位予測モデルを構築できるものと期待される。

3.5. 鶴見川水位予測解析

鶴見川の水位予測シミュレーションの検討を実施した。対象流域の概要を以下に示し、観測データの概要を表 3-59、流域配置図を図 3-174 に示す。

（1）水系

水系：鶴見川（1 級河川）

延長：42.5km

流域面積：235km^2

流域：東京都、神奈川県

管理：国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所

（2）データ期間

2002～2004 年の 1 時間データ

（3）実績水位

寺家橋、浅山橋、末吉橋、落合橋の各水位観測所データ

表 3-59　観測データ概要

水位観測所	指定水位 (m)	警戒水位 (m)	危険水位 (m)	計画水位 (m)	豊水位 (m)	流域面積 (km^2)
寺家橋	2.75	3.50			-0.44	26
浅山橋	2.40	3.20			0.12	27
末吉橋	2.20	2.70	3.80	3.82	0.21	230
落合橋	3.50	4.50	-	5.85	0.16	112

（3）実績雨量

気象庁レーダーアメダス解析雨量

（4）実績気圧

気象庁気象台　横浜地点

（5）実績風向・風速

気象庁アメダス　三浦地点

（6）天文潮位

気象庁潮位表　東京湾

（７）流域配置図



図 3-174　鶴見川流域配置図

3.5.1. 水位予測モデルの構築

水位予測モデルの作成に用いたデータは、水位とレーダーアメダス解析雨量（5kmメッシュ）の時間毎データとし、感潮区間の末吉橋について天文潮位、気圧、風向風速のデータも追加した。末吉橋の学習期間はH15年、その他の水位観測所の学習期間はH14～H15年とし、予測期間はH16年とした。

非感潮域と感潮域の水位予測モデルを式3-9～式3-11に示し、表3-60に各観測所の境界条件別の過去参照時間を示す。精度比較のため、メッシュ雨量を1要素に単純平均してから入力する「平均雨量モデル」と、メッシュ雨量を平均化せずにメッシュ数分の要素で入力する「メッシュ雨量モデル」をそれぞれ構築した。

非感潮域：

$$H(t+1)=f\left(H(t),...,H(t-t_H+1),R(t+1),...,R(t-t_R+2)\right) \qquad \text{式 3-9}$$

感潮域：

$$H(t+1)=f\begin{pmatrix}H(t),...,H(t-t_H+1),R(t+1),...,R(t-t_R+2),\\S(t+1),...,S(t-t_S+2),P(t+1),...,P(t-t_R+2),\\W(t+1),...,W(t-t_W+2)\end{pmatrix} \qquad \text{式 3-10}$$

$$W=V^2\cos\theta \qquad \text{式 3-11}$$

ここで、H：水位、R：雨量、S：天文潮位、P：気圧、W：湾軸方向風圧、V：風速、θ：風向、t：時間である。

表3-60　過去参照時間

水位観測所	t_H	t_R	t_S	t_P	t_W
寺家橋	4	10	-	-	-
浅山橋	4	10	-	-	-
末吉橋	25	4	26	17	8
落合橋	12	12	-	-	-

解析では６時間先までの実績雨量/天文潮位/気圧/風向風速を用い６時間先までの水位を予測した。表 3-61 に時刻 t の実績水位 $H(t)$を初期値とし、1 時刻先の $H(t+1)$の水位を予測する場合の入出力データを示す。$H(t+6)$を計算するためには、これを６ステップ繰り返す。ただし、$H(t+2)$から $H(t+5)$は各ステップの計算値が入る。

表 3-61　水位予測計算の入出力データ

時刻	水位	レーダ雨量	天文潮位	気圧	風圧
$t-t_W+2$	・・・	・・・	・・・	・・・	$W(t-t_W+2)$
・・・	・・・	・・・	・・・	・・・	・・・
$t-t_P+2$	・・・	・・・	・・・	$P(t-t_P+2)$	・・・
・・・	・・・	・・・	・・・	・・・	・・・
$t-t_S+2$	・・・	・・・	$S(t-t_S+2)$	・・・	・・・
・・・	・・・	・・・	・・・	・・・	・・・
$t-t_R+2$	・・・	$R(t-t_R+2)$	・・・	・・・	・・・
・・・	・・・	・・・	・・・	・・・	・・・
$t-t_H+1$	$H(t-t_H+1)$	・・・	・・・	・・・	・・・
・・・	・・・	・・・	・・・	・・・	・・・
t	$H(t)$	$R(t)$	$S(t)$	$P(t)$	$W(t)$
$t+1$	$H_p(t+1)$	$R(t+1)$	$S(t+1)$	$P(t+1)$	$W(t+1)$

入力に用いた雨量メッシュを図 3-175～図 3-178 に示す。メッシュサイズは 2.5km で、太線領域は各水位予測モデルの境界条件として使用した雨量メッシュである。太線領域の北西端を起点として東方向に向かってメッシュ番号を１から付与し、東端まで到達したら１メッシュ南の西端から継続して番号を付与した。



図 3-175　寺家橋水位（８メッシュ）



図 3-176　浅山橋水位（６メッシュ）

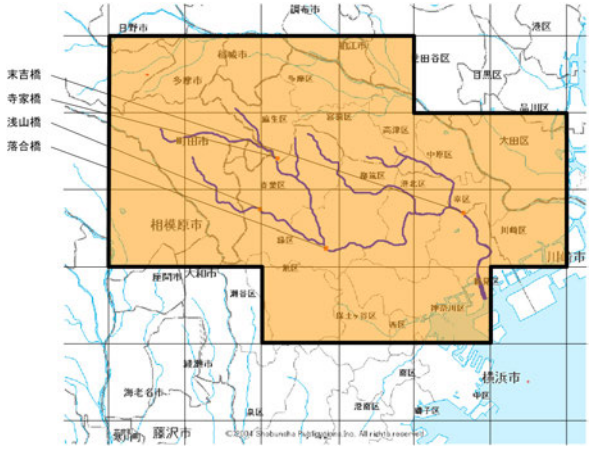


図 3-177　末吉橋水位（１９メッシュ）



図 3-178　落合橋水位（１２メッシュ）

3.5.2. 学習トレース結果

学習が十分に行われたかを確認するため、学習に用いたデータを用いて水位予測計算を実施した。各観測所における平均雨量モデルの結果とメッシュ雨量モデルの結果を図 3-179～図 3-186 に示す。

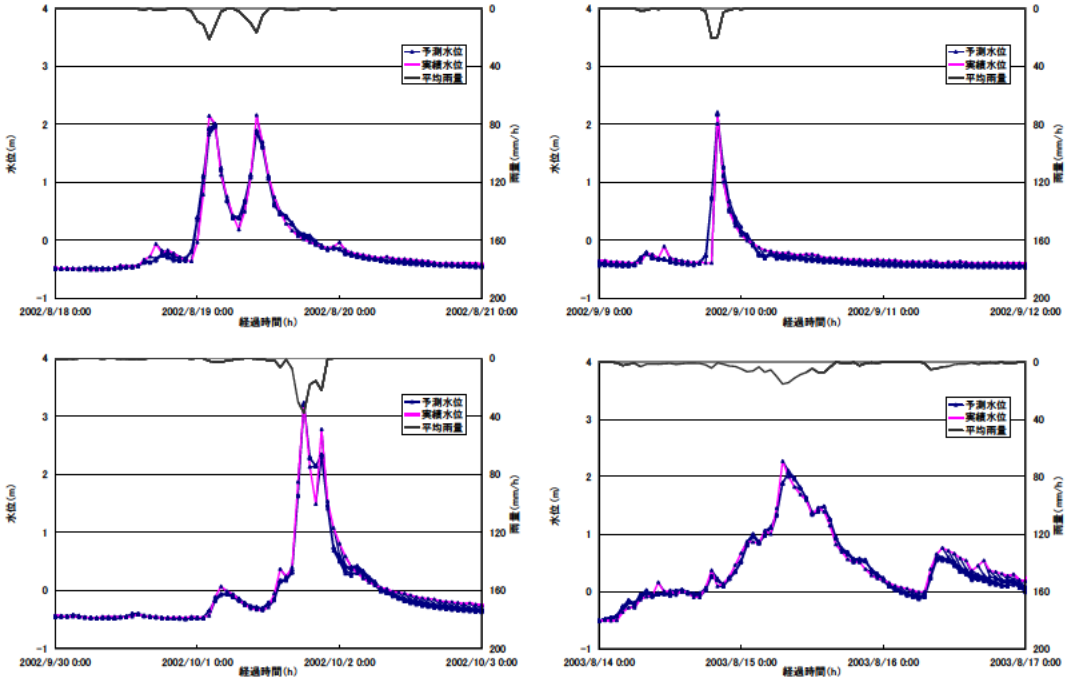


図 3-179　寺家橋水位　学習トレース結果（平均雨量）

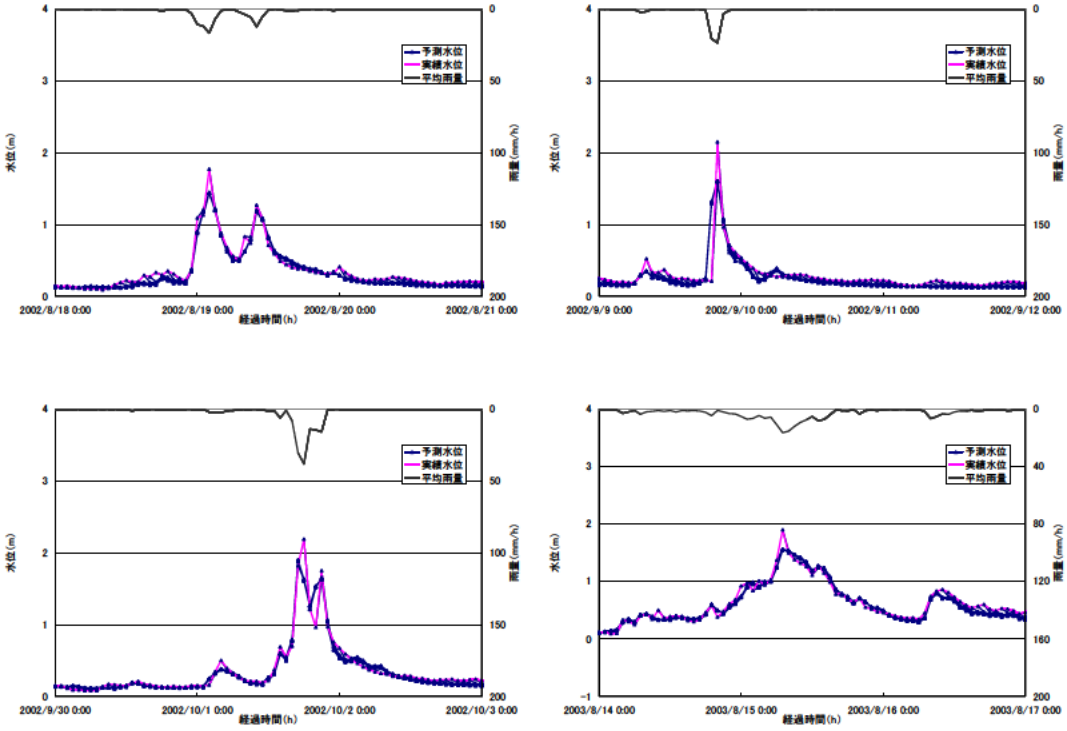


図 3-180　浅山橋水位　学習トレース結果（平均雨量）

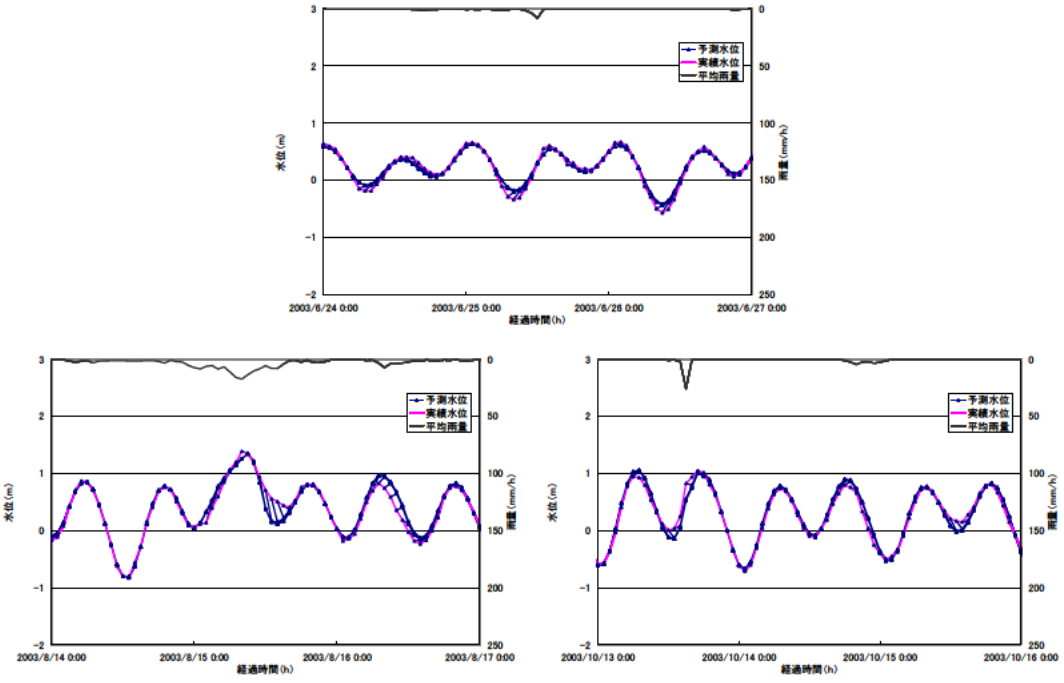


図 3-181　末吉橋水位　学習トレース結果（平均雨量）

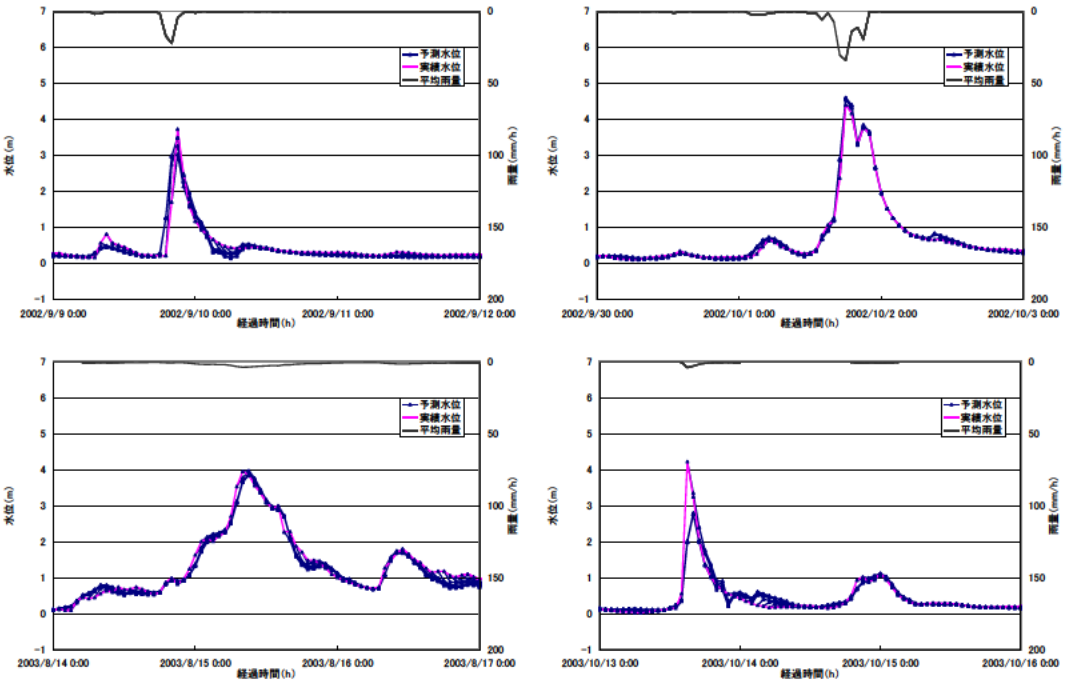


図 3-182　落合橋水位　学習トレース結果（平均雨量）

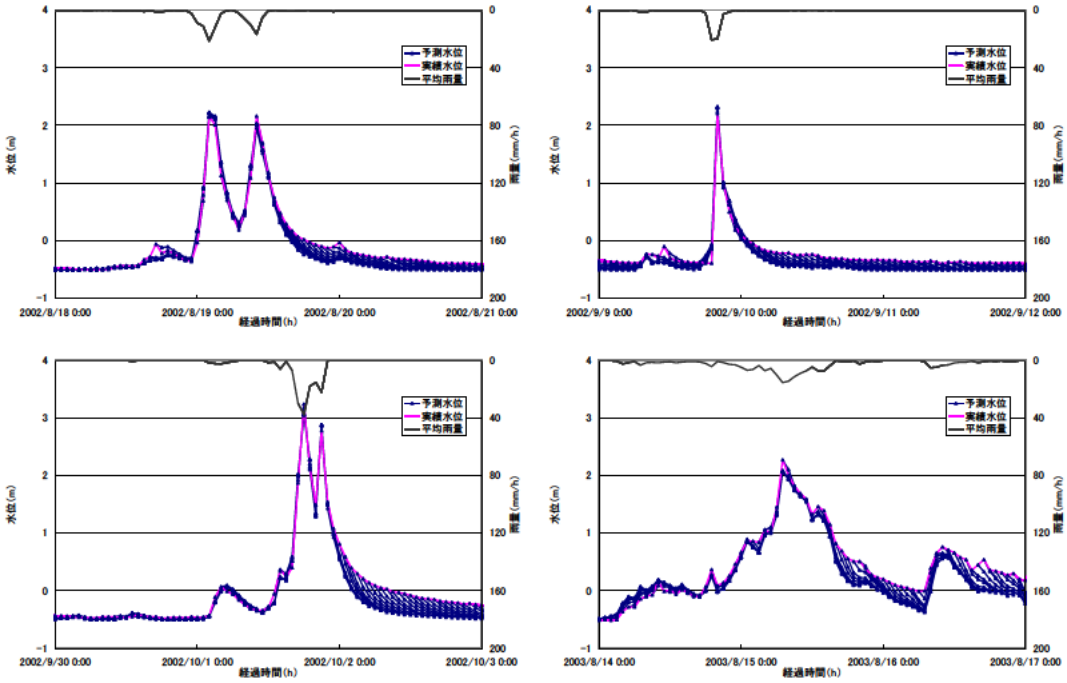


図 3-183　寺家橋水位　学習トレース結果（メッシュ雨量）

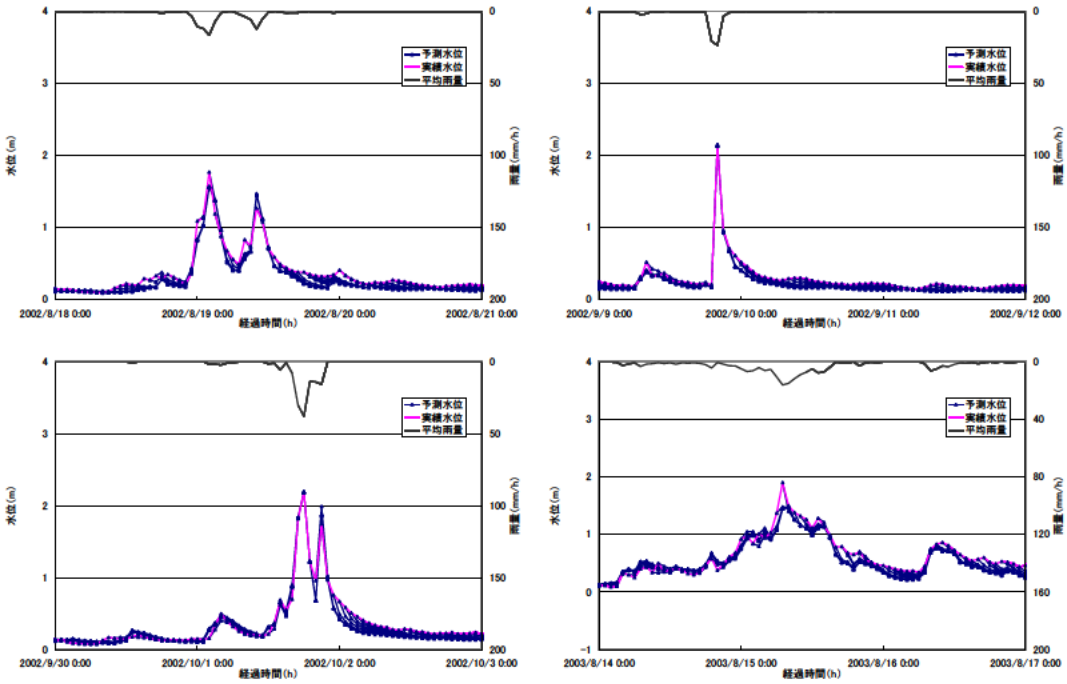


図 3-184　浅山橋水位　学習トレース結果（メッシュ雨量）

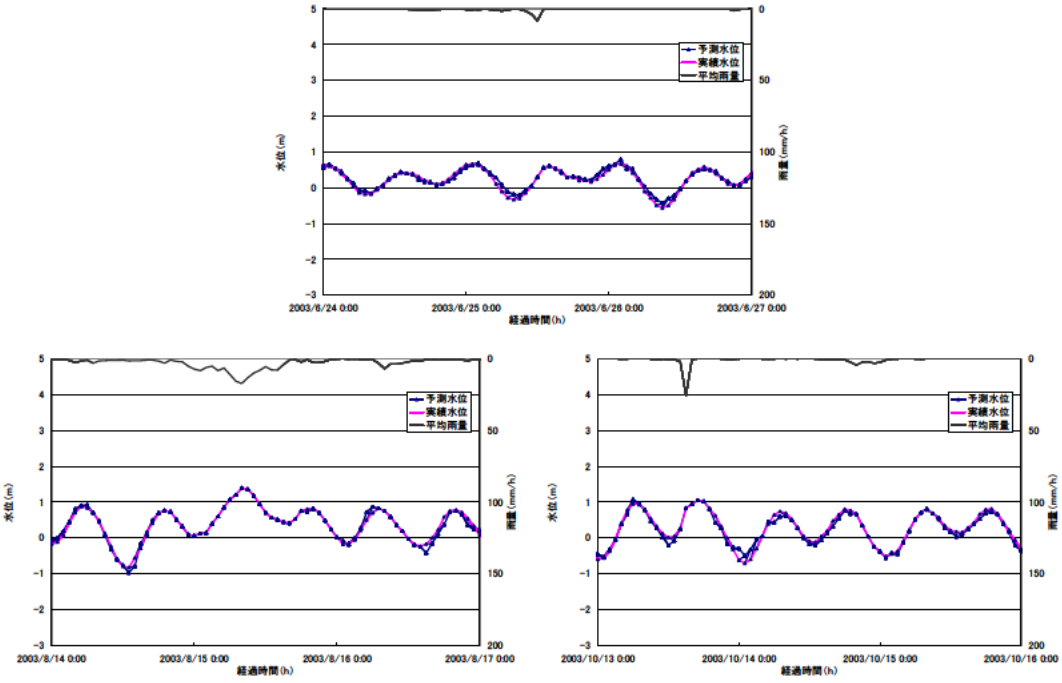


図 3-185　末吉橋水位　学習トレース結果（メッシュ雨量）

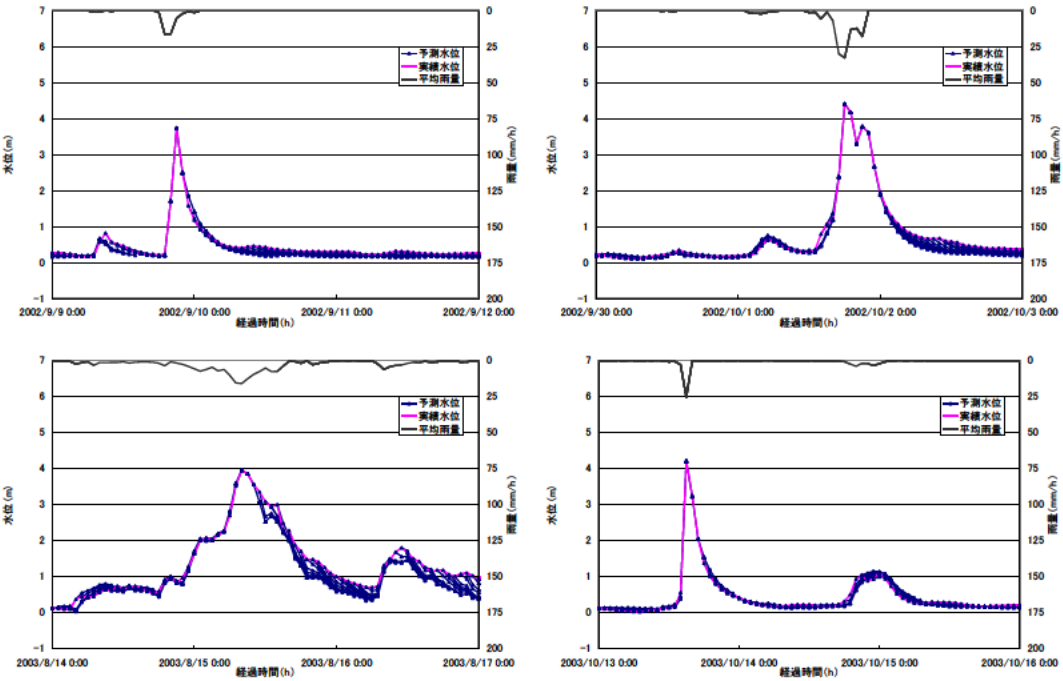


図 3-186　落合橋水位　学習トレース結果（メッシュ雨量）

3.5.3. 未知データの予測結果

次にモデルにとっては未知となるデータを用いてモデルの予測計算を実施した。各観測所における平均雨量モデルの結果とメッシュ雨量モデルの結果を図 3-187～図 3-194 に示す。

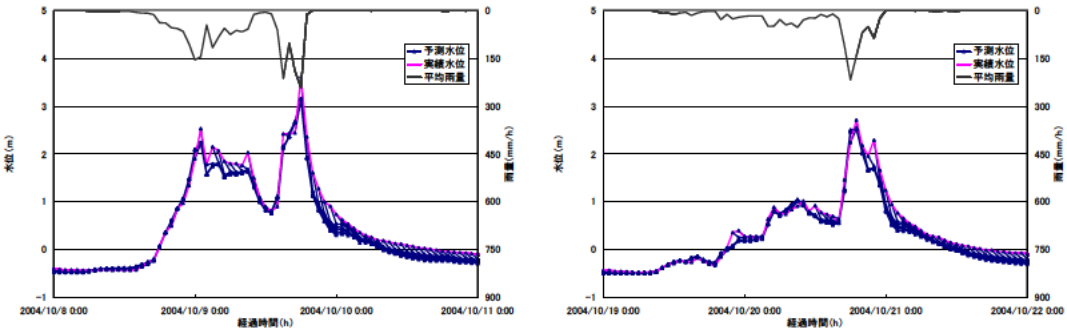


図 3-187　寺家橋水位　未知予測結果（平均雨量）

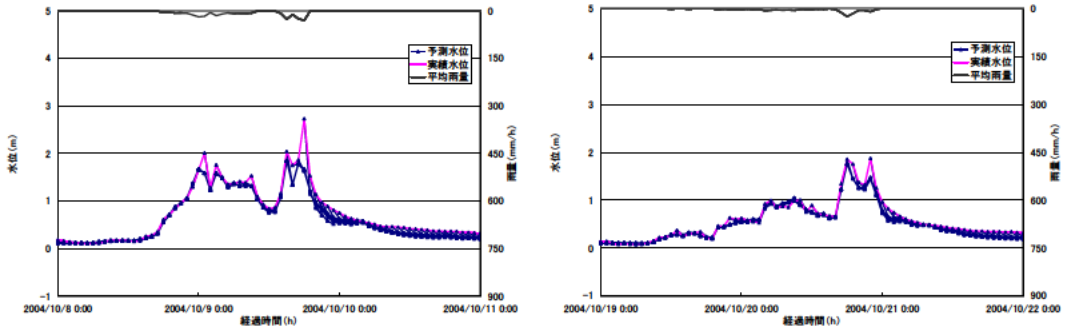


図 3-188　浅山橋水位　未知予測結果（平均雨量）

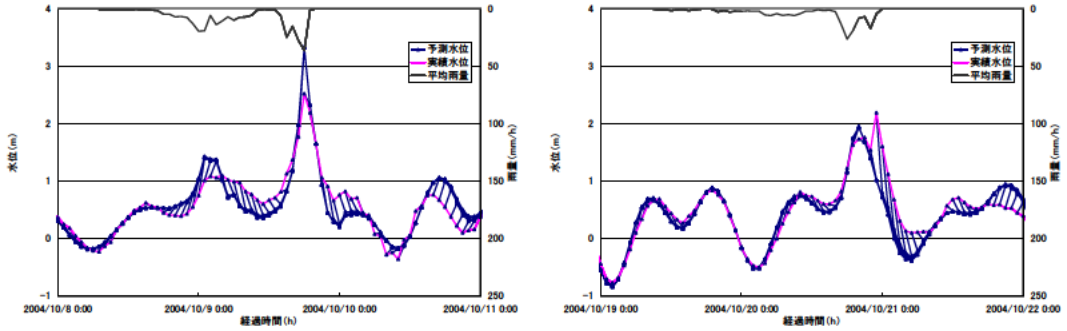


図 3-189　末吉橋水位　未知予測結果（平均雨量）

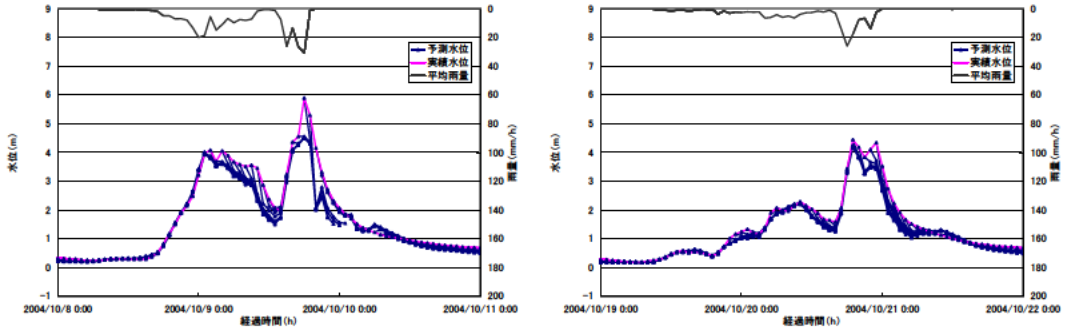


図 3-190　落合橋水位　未知予測結果（平均雨量）

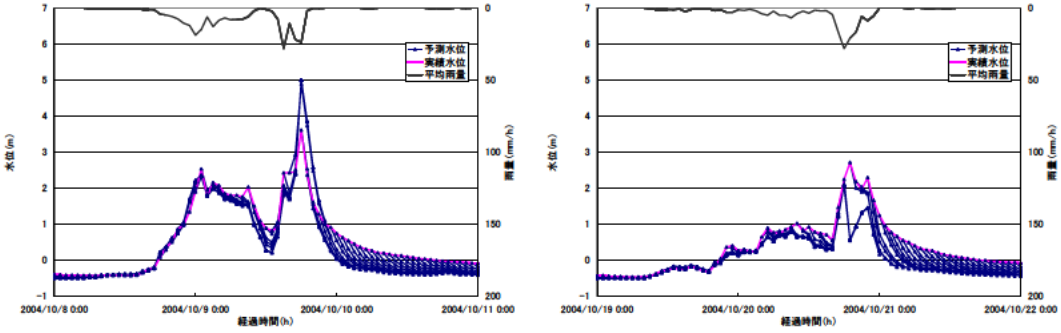


図 3-191　寺家橋水位　未知予測結果（メッシュ雨量）

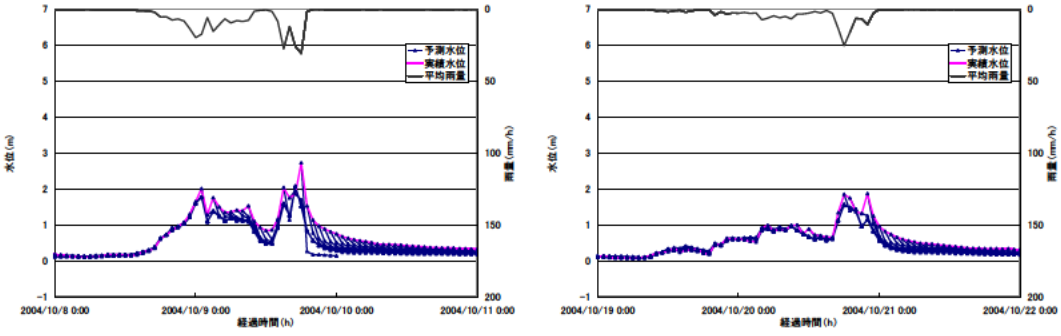


図 3-192　浅山橋水位　未知予測結果（メッシュ雨量）

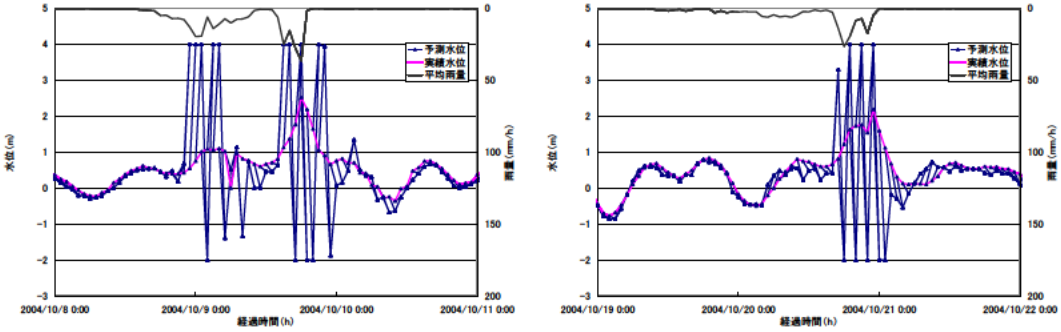


図 3-193　末吉橋水位　未知予測結果（メッシュ雨量）

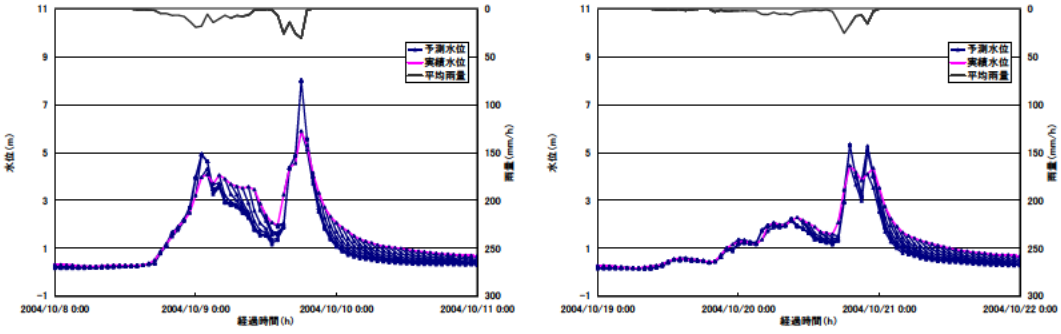


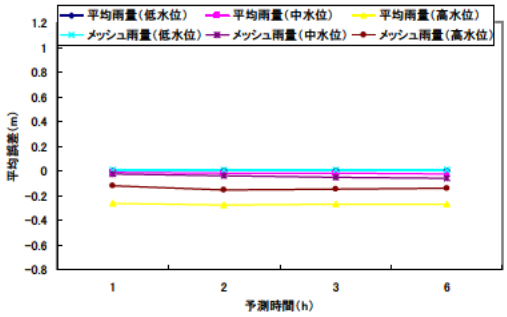
図 3-194　落合橋水位　未知予測結果（メッシュ雨量）

3.5.4. 水位レベル別精度評価

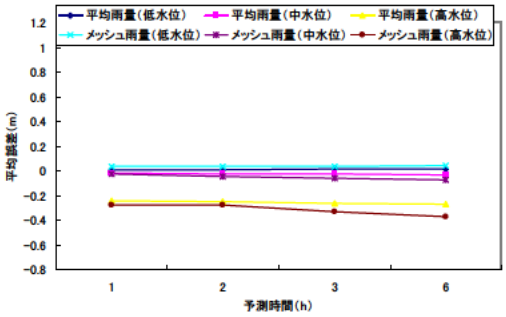
学習トレースと未知データの予測について、それぞれ平均誤差と RMSE を調査した結果を図 3-195～図 3-198 に示す。各グラフは、メッシュ雨量と平均雨量に対する水位の高さ毎の予測先行時間と予測誤差の関係を示している。水位の高さは、低水位（レベル１）を最低水位から豊水位まで、中水位（レベル２）を豊水位から４番目に大きいピーク水位まで、高水位（レベル３）を４番目に大きいピーク水位から最大水位までの 3 段階に分類した。表 3-62 に水位観測所ごとの水位範囲を示す。

表 3-62　評価対象の水位範囲

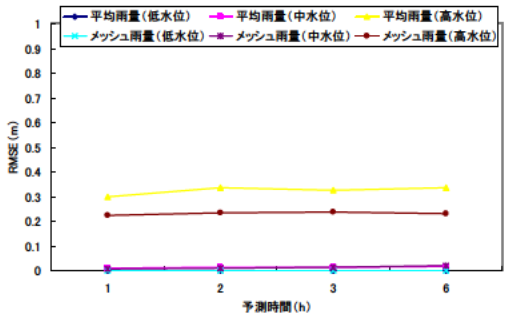
水位観測所	水位レベル	最小値	最大値
寺家橋	低水位（レベル１）	—∞	-0.44
	中水位（レベル２）	-0.44	1.74
	高水位（レベル３）	1.74	∞
浅山橋	低水位（レベル１）	—∞	0.12
	中水位（レベル２）	0.12	1.65
	高水位（レベル３）	1.65	∞
末吉橋	低水位（レベル１）	—∞	0.21
	中水位（レベル２）	0.21	1.29
	高水位（レベル３）	1.29	∞
落合橋	低水位（レベル１）	—∞	0.16
	中水位（レベル２）	0.16	2.69
	高水位（レベル３）	2.69	∞



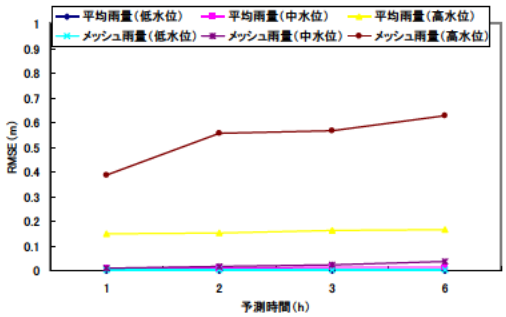
（a）学習トレースの平均誤差



（b）未知予測の平均誤差

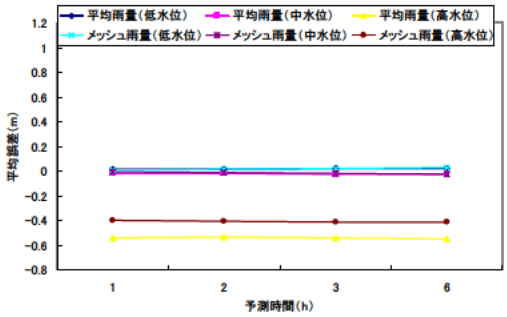


（c）学習トレースの RMSE

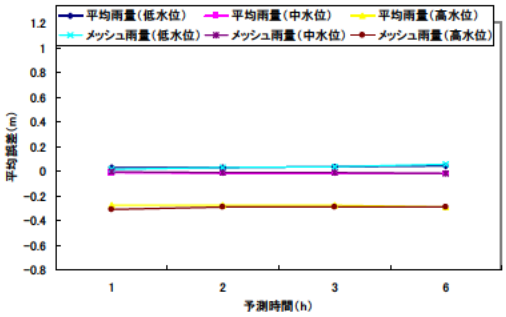


（d）未知予測の RMSE

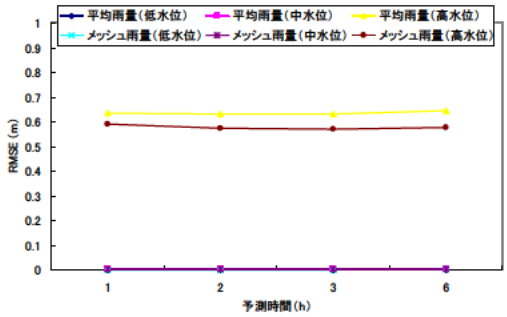
図 3-195　寺家橋水位　雨量別・予測時間別の精度評価



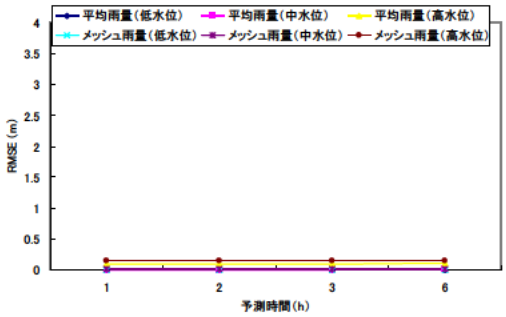
（a）学習トレースの平均誤差



（b）未知予測の平均誤差

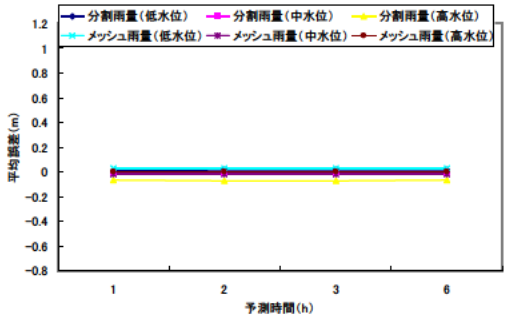


（c）学習トレースの RMSE

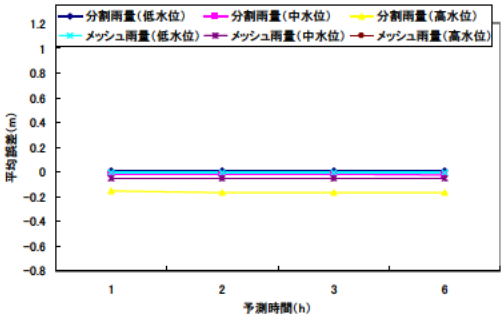


（d）未知予測の RMSE

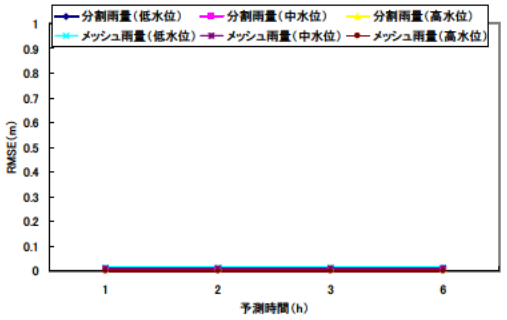
図 3-196　浅山橋水位　雨量別・予測時間別の精度評価



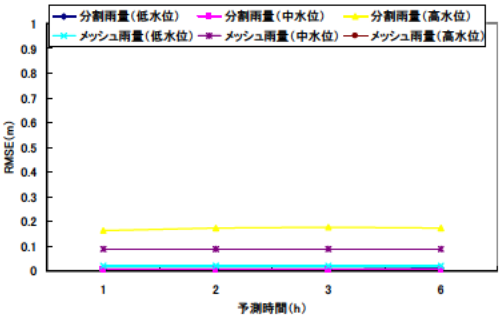
（a）学習トレースの平均誤差



（b）未知予測の平均誤差

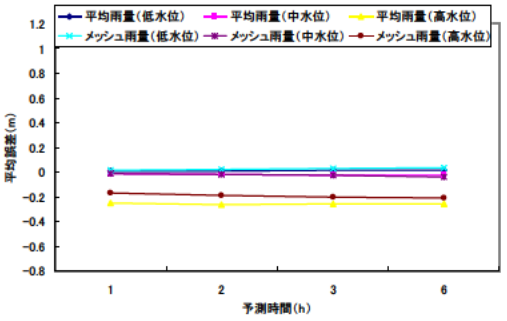


（c）学習トレースの RMSE

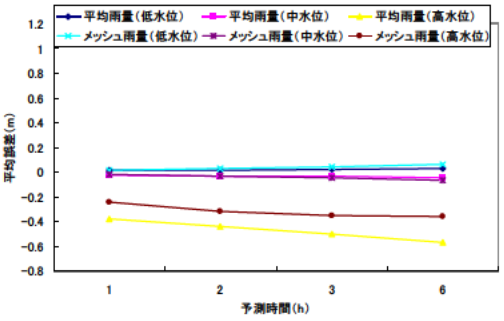


（d）未知予測の RMSE

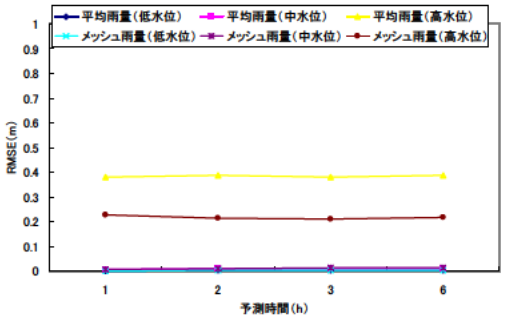
図 3-197　末吉橋水位　雨量別・予測時間別の精度評価



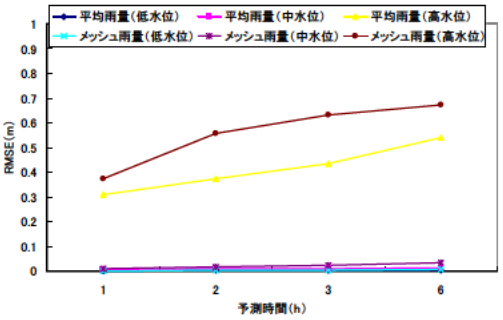
（a）学習トレースの平均誤差



（b）未知予測の平均誤差



（c）学習トレースの RMSE



（d）未知予測の RMSE

図 3-198　落合橋水位　雨量別・予測時間別の精度評価

図 3-195～図 3-198 を基に、6 時間先予測を対象としてメッシュ雨量よりも平均雨量を用いた方が RMSE が小さくなるケースを表 3-63 にまとめた。学習トレースの高水位を除く全てのケースにおいて、平均雨量モデルの方が RMSE が小さくなる割合が高いことが分かる。

表 3-63　メッシュ雨量に対して平均雨量の RMSE が小さくなるケース

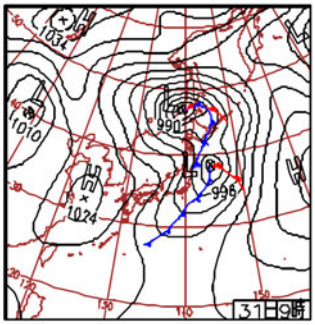
	学習トレース				未知予測			
	全体	低水位	中水位	高水位	全体	低水位	中水位	高水位
浅山橋	○	○	○		○	○	○	○
寺家橋	○	○	○		○	○	○	○
落合橋	○	○	○		○	○	○	○
末吉橋	○	○	○		○	○	○	○
計	4(100%)	4(100%)	4(100%)	0(0%)	4(100%)	4(100%)	4(100%)	4(100%)

3.5.5. 出水ピーク・立上り・立下り精度評価

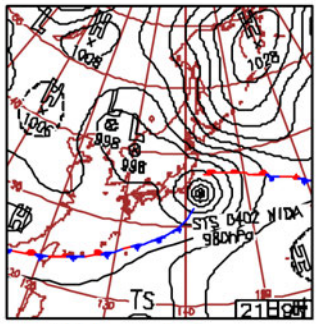
未知データの中で規模の大きな出水１０イベントを抽出し、水位ピーク誤差の精度評価を行った。評価対象とした出水ピークの日時を表 3-64 に示し、天気図を図 3-199 に示す。イベント No.はピーク水位の大きい順に割り当てた。

表 3-64　各水位観測所の出水ピーク日時

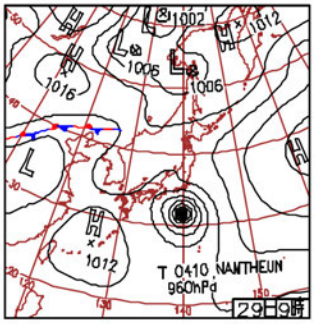
	寺家橋	気象概況	浅山橋	気象概況	落合橋	気象概況
No 1	2004/10/9 18:00	台風第 22 号/ 前線	2004/10/9 18:00	台風第 22 号/.前線	2004/10/9 18:00	台風第 22 号/.前線
No 2	2004/10/20 19:00	台風第 23 号/前線	2004/10/20 22:00	台風第 23 号/前線	2004/10/20 19:00	台風第 23 号/前線
No 3	2004/9/30 3:00	台風第 21 号/前線	2004/9/30 3:00	台風第 21 号/前線	2004/9/4 23:00	秋雨前線
No.4	2004/9/4 22:00	秋雨前線	2004/7/29 13:00	台風第 10 号	2004/9/30 4:00	台風第 21 号/前線
No 5	2004/12/5 6:00	低気圧	2004/9/4 22:00	秋雨前線	2004/5/21 4:00	台風第 2 号/前線
No.6	2004/10/31 5:00	秋雨前線	2004/10/31 5:00	秋雨前線	2004/10/31 6:00	秋雨前世ｎ
No.7	2004/10/5 9:00	秋雨前線	2004/5/21 3:00	台風第 2 号/前線	2004/10/5 10:00	秋雨前線
No.8	2004/5/21 3:00	台風第 2 号/前線	2004/10/5 9:00	秋雨前線	2004/12/5 6:00	低気圧
No 9	2004/7/29 13:00	台風第 10 号	2004/12/5 6:00	低気圧	2004/7/29 14:00	台風第 10 号
No.10	2004/3/31 1:00	低気圧	2004/3/31 0:00	低気圧	2004/3/31 2:00	低気圧



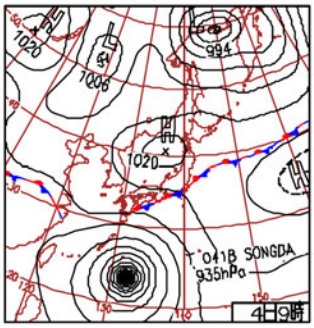
2004/3/31



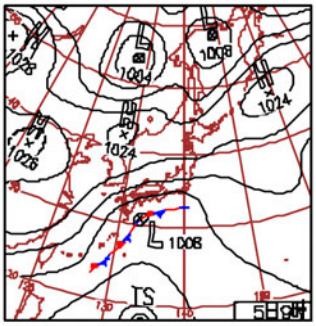
2004/5/21



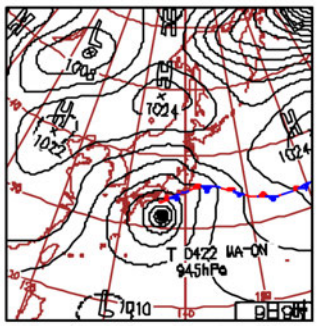
2004/7/29



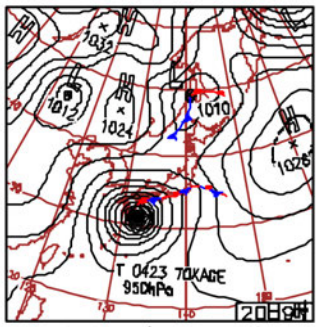
2004/9/30



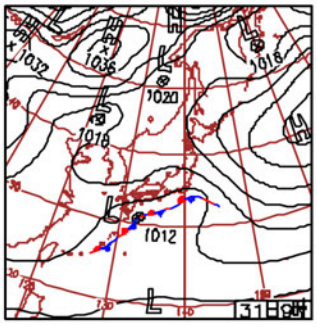
2004/10/5



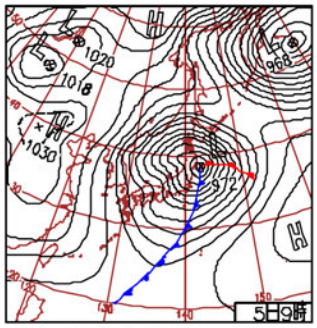
2004/10/9



2004/10/20



2004/10/31



2004/12/5

図 3-199　出水ピーク日の天気図

（1）ピーク評価

各水位観測所のピーク精度評価結果を図 3-200～図 3-202、表 3-65～表 3-67 に示す。寺家橋の上位 3 出水、浅山橋、落合橋の上位 1 出水を除き、ピーク誤差が 1m 未満に収まっていることが分かる。

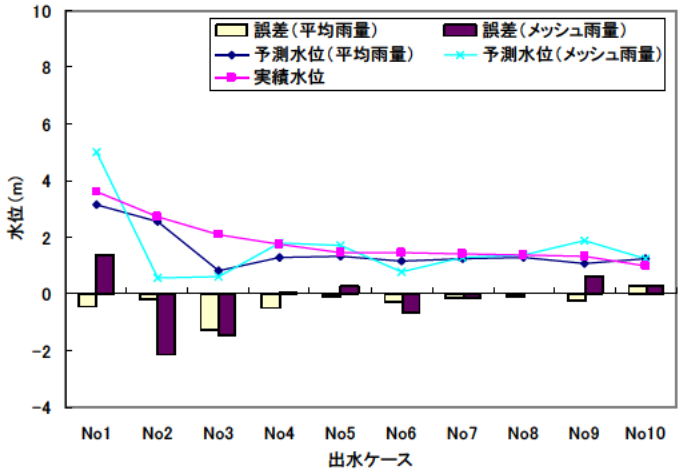


図 3-200　寺家橋水位　ピーク精度評価

表 3-65　寺家橋水位　ピーク精度評価

	平均雨量			メッシュ雨量		
	予測水位	実績水位	誤差	予測水位	実績水位	誤差
No1	3.144217	3.61	−0.46578	5	3.61	1.39
No2	2.535343	2.71	−0.17466	0.569838	2.71	−2.14016
No3	0.836123	2.1	−1.26388	0.628721	2.1	−1.47128
No4	1.268211	1.74	−0.47179	1.799762	1.74	0.059762
No5	1.345533	1.46	−0.11447	1.718824	1.46	0.258824
No6	1.15735	1.44	−0.28265	0.763589	1.44	−0.67641
No7	1.244946	1.4	−0.15505	1.26776	1.4	−0.13224
No8	1.275463	1.38	−0.10454	1.387406	1.38	0.007406
No9	1.08565	1.31	−0.22435	1.899612	1.31	0.589612
No10	1.25496	0.98	0.27496	1.255099	0.98	0.275099
RMSE			0.481802			0.982141

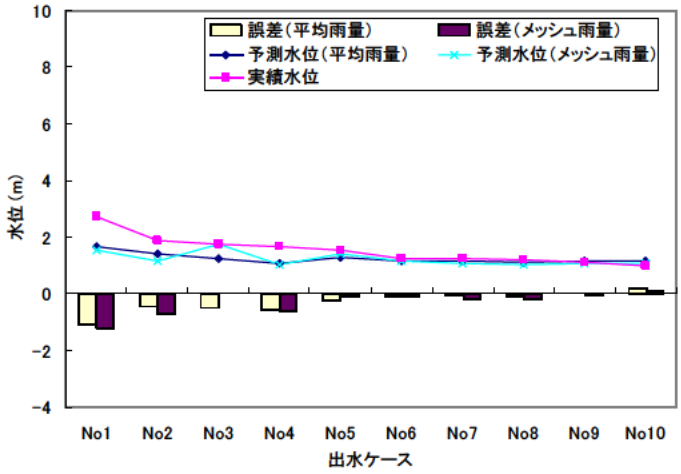


図 3-201　浅山橋水位　ピーク精度評価

表 3-66　浅山橋水位　ピーク精度評価

	平均雨量			メッシュ雨量		
	予測水位	実績水位	誤差	予測水位	実績水位	誤差
No1	1.657209	2.73	-1.07279	1.531759	2.73	-1.19824
No2	1.431297	1.87	-0.4387	1.149041	1.87	-0.72096
No3	1.264048	1.74	-0.47595	1.752606	1.74	0.012606
No4	1.057333	1.65	-0.59267	1.020218	1.65	-0.62978
No5	1.305823	1.56	-0.25418	1.430462	1.56	-0.12954
No6	1.152606	1.26	-0.10739	1.145529	1.26	-0.11447
No7	1.168834	1.24	-0.07117	1.059811	1.24	-0.18019
No8	1.109243	1.22	-0.11076	1.015846	1.22	-0.20415
No9	1.138993	1.12	0.018993	1.069696	1.12	-0.0503
No10	1.168865	0.99	0.178865	1.08482	0.99	0.09482
RMSE			0.452432			0.496779

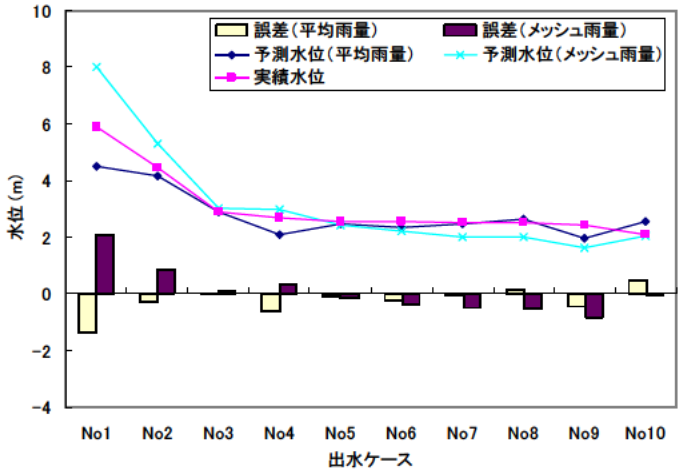


図 3-202　落合橋水位　ピーク精度評価

表 3-67　落合橋水位　ピーク精度評価

	平均雨量			メッシュ雨量		
	予測水位	実績水位	誤差	予測水位	実績水位	誤差
No1	4.499046	5.89	-1.39095	8	5.89	2.11
No2	4.169167	4.44	-0.27083	5.320358	4.44	0.880358
No3	2.881914	2.89	-0.00809	3.002967	2.89	0.112967
No4	2.087023	2.69	-0.60298	2.984765	2.69	0.294765
No5	2.451803	2.57	-0.1182	2.41218	2.57	-0.15782
No6	2.332363	2.57	-0.23764	2.205852	2.57	-0.36415
No7	2.462852	2.53	-0.06715	2.021276	2.53	-0.50872
No8	2.657862	2.52	0.137862	1.998092	2.52	-0.52191
No9	1.975854	2.44	-0.46415	1.632938	2.44	-0.80706
No10	2.557309	2.08	0.477309	2.032453	2.08	-0.04755
RMSE			0.539348			0.816645

平均雨量とメッシュ雨量の違いを比較するため、各出水イベントについてメッシュ雨量よりも平均雨量を用いた方が予測誤差が小さくなるケースを調査した結果を表 3-68 にまとめた。いずれの観測所においてもメッシュ雨量より平均雨量を用いた方が誤差が小さくなる割合が高いことが分かる。

表 3-68　メッシュ雨量モデルに対して平均雨量モデルのピーク誤差が小さくなるケース

（観測所名の括弧は雨量メッシュ数）

	小　←　流域面積　→　大		
	浅山橋 (6)	寺家橋 (8)	落合橋 (12)
No.1	○	○	○
No.2	○	○	○
No.3		○	○
No.4	○		
No.5		○	○
No.6	○	○	○
No.7	○		○
No.8	○		○
No.9	○	○	○
No.10		○	
計	7 (70%)	7 (70%)	8 (80%)

次に、平均雨量とメッシュ雨量のピーク予測誤差の平均を図 3-203 に示す。いずれの観測所においても平均雨量を用いた方が誤差が小さくなることが分かる。

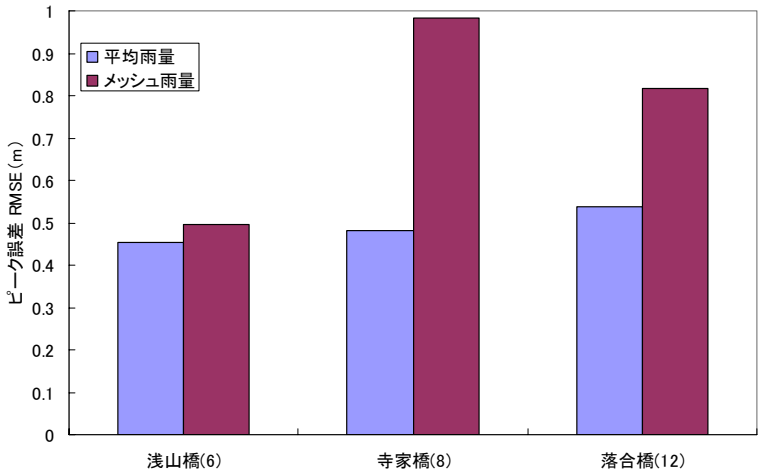


図 3-203　TOP10 出水のピーク誤差比較

（2）立上り・立下り評価

各水位観測所の立上りと立下りの精度評価結果を図 3-204～図 3-209、表 3-69～表 3-71 に示す。立ち上がりと立下りの精度の顕著な差異は見られなかった。

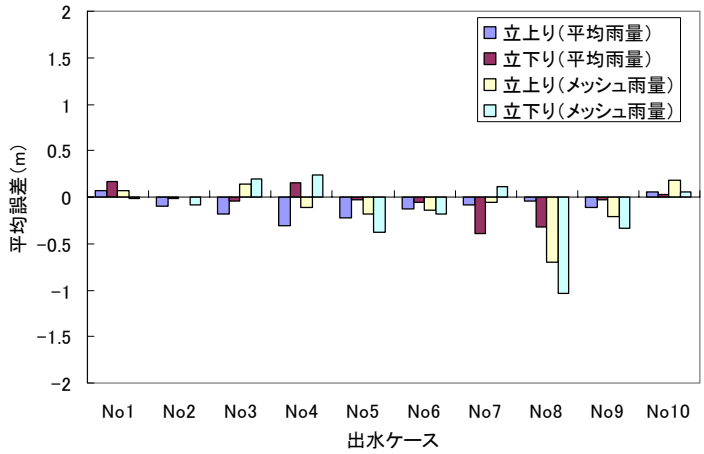


図 3-204　寺家橋水位　立上り・立下り精度評価（平均誤差）

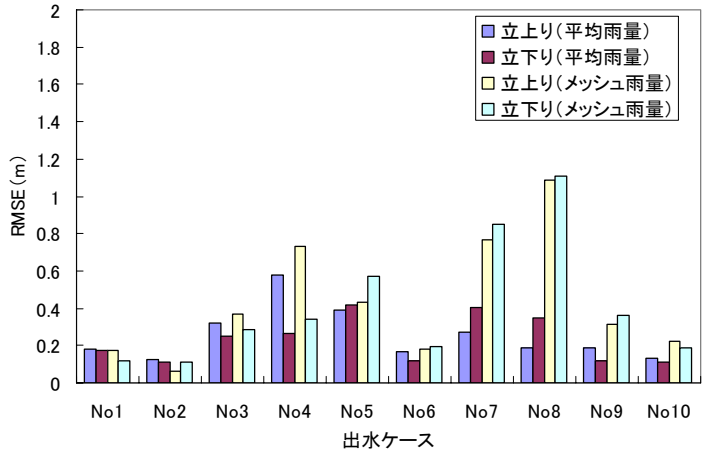


図 3-205　寺家橋水位　立上り・立下り精度評価（RMSE）

表 3-69　寺家橋水位　立上り・立下り精度評価

	平均雨量				メッシュ雨量			
	平均誤差		RMSE		平均誤差		RMSE	
	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り
No.1	0.075801	0.162639	0.180857	0.173754	0.068702	-0.01117	0.172699	0.116551
No.2	-0.09282	-0.01827	0.122632	0.109341	0.003268	-0.08196	0.062331	0.11417
No.3	-0.17936	-0.04645	0.317758	0.254133	0.14329	0.194198	0.369518	0.285766
No.4	-0.31329	0.152214	0.579079	0.262774	-0.11709	0.242778	0.730772	0.339791
No.5	-0.21896	-0.03236	0.387732	0.42133	-0.18157	-0.37982	0.433682	0.572384
No.6	-0.12459	-0.0527	0.163778	0.116984	-0.13771	-0.18274	0.178901	0.197205
No.7	-0.08387	-0.3942	0.270928	0.407008	-0.05788	0.117388	0.767187	0.853238
No.8	-0.04814	-0.32563	0.188143	0.351514	-0.70172	-1.02864	1.08827	1.104642
No.9	-0.11538	-0.0283	0.190865	0.118978	-0.20434	-0.32908	0.310932	0.364115
No.10	0.056874	0.029231	0.132271	0.109025	0.188086	0.051684	0.226473	0.186929

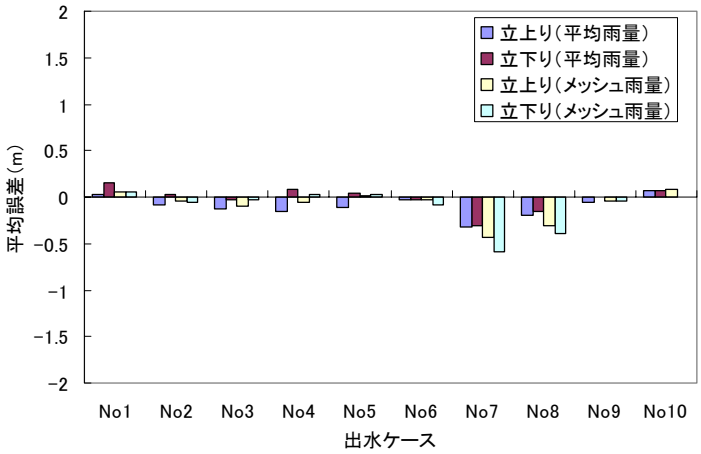


図 3-206　浅山橋水位　立上り・立下り精度評価（平均誤差）

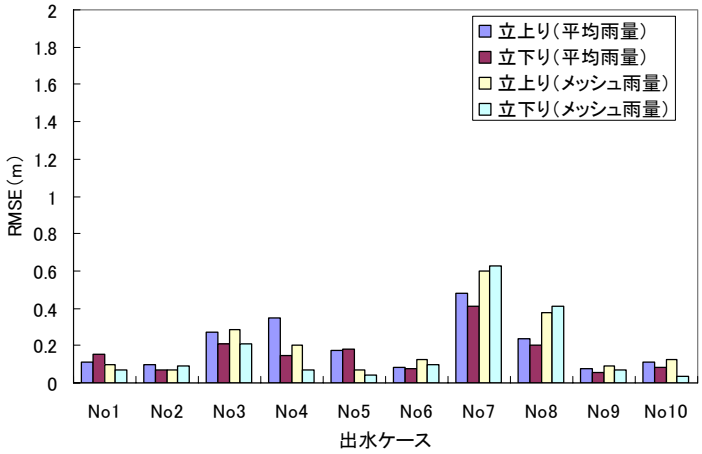


図 3-207　浅山橋水位　立上り・立下り精度評価（RMSE）

表 3-70　浅山橋水位　立上り・立下り精度評価

	平均雨量				メッシュ雨量			
	平均誤差		RMSE		平均誤差		RMSE	
	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り
No.1	0.026614	0.147175	0.11478	0.151343	0.061114	0.061465	0.094083	0.072526
No.2	-0.08664	0.030889	0.10054	0.069086	-0.04024	-0.0579	0.072151	0.087485
No.3	-0.12843	-0.03245	0.271592	0.208011	-0.09737	-0.03102	0.287797	0.208834
No.4	-0.14945	0.079569	0.34727	0.145288	-0.05065	0.028959	0.205134	0.0709
No.5	-0.11043	0.03597	0.176277	0.1791	0.007353	0.024399	0.068806	0.045017
No.6	-0.03338	-0.03035	0.082031	0.074723	-0.03319	-0.07759	0.123304	0.099243
No.7	-0.32333	-0.31271	0.479982	0.411014	-0.43087	-0.58832	0.597922	0.62949
No.8	-0.19612	-0.16042	0.234465	0.199273	-0.30134	-0.39098	0.379196	0.409258
No.9	-0.05185	0.006188	0.074555	0.05237	-0.03588	-0.0438	0.087831	0.072322
No.10	0.071127	0.075666	0.114499	0.085419	0.086677	0.006428	0.125507	0.034602

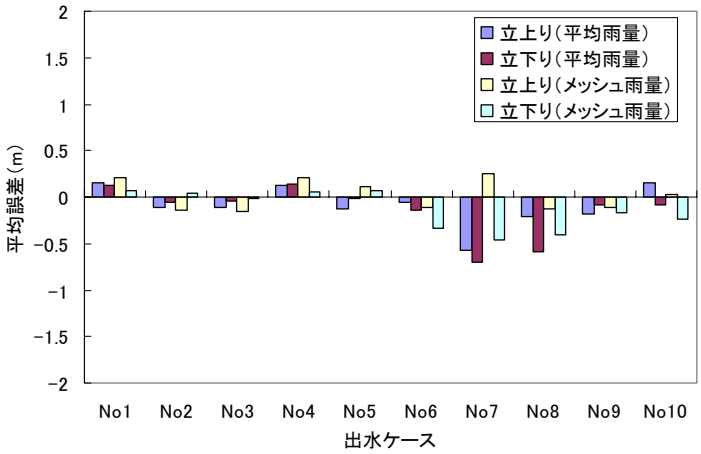


図 3-208　落合橋水位　立上り・立下り精度評価（平均誤差）

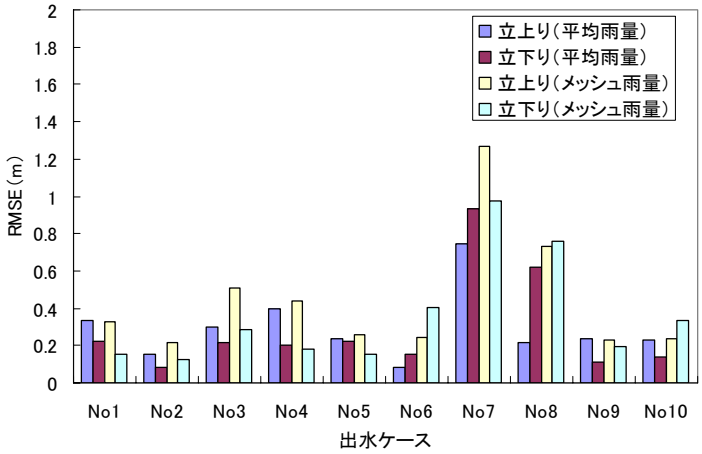


図 3-209　落合橋水位　立上り・立下り精度評価（RMSE）

表 3-71　落合橋水位　立上り・立下り精度評価

	平均雨量				メッシュ雨量			
	平均誤差		RMSE		平均誤差		RMSE	
	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り
No.1	0.149778	0.122423	0.334547	0.221978	0.211803	0.074481	0.326823	0.151688
No.2	-0.10957	-0.05653	0.155176	0.083486	-0.13872	0.038092	0.213145	0.127918
No.3	-0.11408	-0.04326	0.297368	0.217522	-0.14956	-0.01013	0.51198	0.28472
No.4	0.130251	0.142878	0.398436	0.202948	0.206219	0.053522	0.435721	0.183889
No.5	-0.12602	-0.0168	0.235199	0.22102	0.112324	0.066645	0.259956	0.154789
No.6	-0.05896	-0.13347	0.084167	0.151481	-0.11866	-0.33851	0.242264	0.40536
No.7	-0.57109	-0.69426	0.742423	0.931312	0.254923	-0.46031	1.271515	0.972966
No.8	-0.20925	-0.58472	0.215345	0.618805	-0.12973	-0.41021	0.732613	0.758692
No.9	-0.18674	-0.07914	0.237652	0.112625	-0.11268	-0.16456	0.232386	0.193895
No.10	0.157651	-0.08639	0.230094	0.139042	0.0309	-0.232	0.236789	0.337732

平均雨量とメッシュ雨量の違いを比較するため、各出水イベントについてメッシュ雨量よりも平均雨量を用いた方が予測誤差が小さくなるケースを調査した結果を表 3-72 にまとめた。いずれの観測所においても、メッシュ雨量より平均雨量を用いた方が誤差が小さくなる割合が高いことが分かる。

表 3-72　メッシュ雨量モデルに対して平均雨量モデルの立上り・立下り誤差が小さくなるケース

（観測所名の括弧は雨量メッシュ数）

	小　←　流域面積　→　大					
	浅山橋 (6)		寺家橋 (8)		落合橋 (12)	
ケース	立上り	立下り	立上り	立下り	立上り	立下り
No.1					○	○
No.2		○		○	○	○
No.3	○	○	○	○	○	
No.4			○	○	○	
No.5			○	○	○	○
No.6	○	○	○	○	○	○
No.7	○	○	○	○	○	○
No.8	○	○	○	○		○
No.9	○	○	○	○	○	○
No.10	○		○	○	○	○
計	6 (60%)	6 (60%)	8 (80%)	9 (90%)	9 (90%)	8 (80%)

3.5.6. 学習データの範囲と未知データの範囲

計算に用いた学習データと未知データの水位、雨量（感潮域では天文潮位、気圧、風向風速を含む）の最大/最小値を図 3-210～図 3-213 に示す。平均雨量モデルではほとんどのケースで未知データが学習データの範囲内に収まっているが、メッシュ雨量モデルでは雨量が学習範囲を逸脱しているケースが多いことが分かる。学習データが十分揃っている場合にはメッシュ雨量モデルを用いても安定した予測を行えると考えられるが、十分揃っていない場合には平均雨量モデルに比べて不安定性が増すと考えられる。

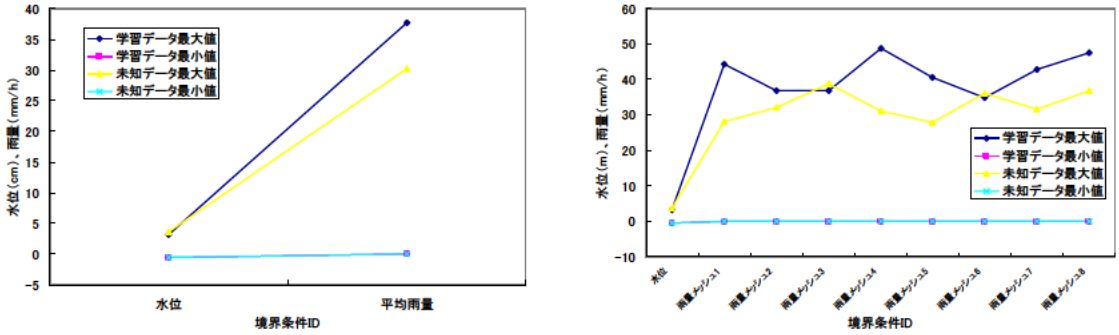


図 3-210　寺家橋モデルの要素別データ範囲（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

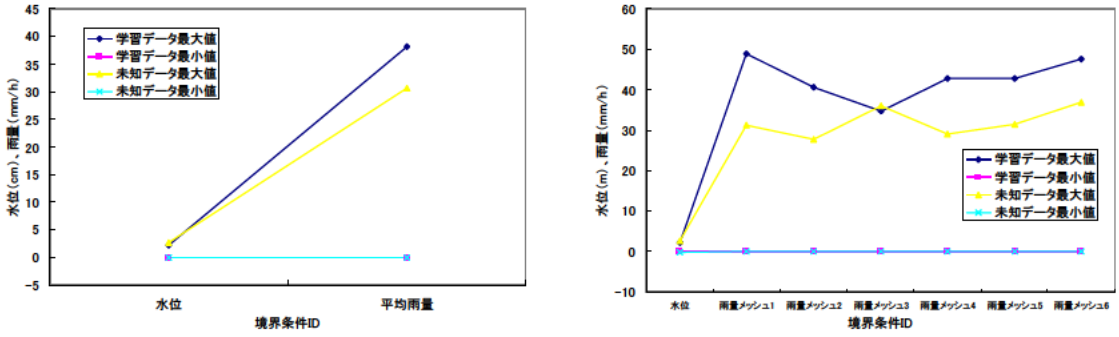


図 3-211　浅山橋モデルの要素別データ範囲（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

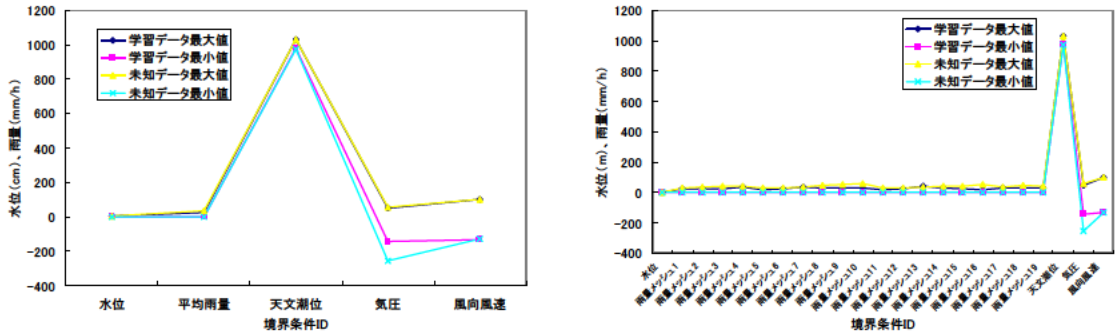


図 3-212　末吉橋モデルの要素別データ範囲（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

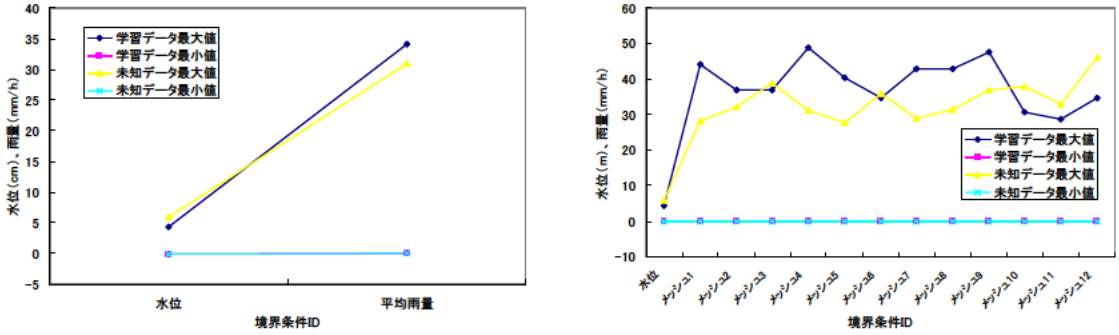


図 3-213　落合橋モデルの要素別データ範囲（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

3.5.7. 流域付帯設備の影響

都市河川である鶴見川には上流の遊水地や下水等の取排水設備などの人工施設があり、雨量のみから水位を予測するには条件が不足していると考えられる。流域管内図を参考として、水位に影響する可能性のある設備を表 3-73 に示す。これらの運用データをモデルの入力条件に追加することができれば予測精度を更に向上できる可能性がある。

表 3-73　水位に影響を及ぼす可能性のある施設

水位観測所	施設
寺家橋	恩廻公園調整池、鶴見川クリーンセンター
浅山橋	成瀬クリーンセンター
末吉橋	鶴見多目的遊水地、港北水再生センター、ポンプ場排水樋管
落合橋	恩廻公園調節池、都筑水再生センター、川和遊水地

3.5.8. まとめ

鶴見川の事例では、2 年分のデータを用いて寺家橋、浅山橋、末吉橋、落合橋の各水位予測モデルを構築し、それ以外の 1 年分のデータを用いて予測検証を実施した。鶴見川は近年急速に都市化が進んでいる代表的な都市型河川であり、効果的な治水対策が重要な河川流域である。

本解析では、下水等の取排水設備の影響を無視し、降雨と水位のデータから水位予測モデルを構築した。なお、下流の末吉橋地点は感潮域であるため、モデルの入力条件に天文潮位、気圧、風圧を追加してモデルを構築した。水位の高さごとに予測先行時間と予測誤差の関係を検証した結果、予測先行時間が大きくなるほど予測誤差も大きくなるものの、一部の例外を除き RMSE 誤差が 0.7m 以内に収まっており、実用上十分な予測精度であることを確認した。また、学習トレースと未知データ予測の精度比較を行った結果、学習トレースでは高水位を除き平均雨量を用いた方が高精度となり、未知データ予測では全ての水位レベルで平均雨量を用いた方が高精度となった。また未知データの中から 10 出水を抽出し、立上り・ピーク・立下りの精度評価を実施した結果では、平均雨量を用いた方が予測精度が高くなるケースが多いことを確認した。このことから、高水位では少なくとも平均雨量を用いた方が未知データに対する予測安定性が高くなることが分かる。本検証の結果では、取排水設備の影響を無視し、適切な雨量データを入力することにより、実用上十分な精度の予測モデルを構築できることを確認したが。今後、取排水設備の運用データを入力情報に追加することが出来れば更に精度が向上すると考えられる。本手法の適用により、全国の都市型河川においても高精度な水位予測モデルを構築できるものと期待される。

3.6. 御笠川水位予測解析

御笠川の水位予測シミュレーションの検討を実施した。対象流域の概要を以下に示し、観測データの概要を表 3-74 に示す。

（1）水系

水系：御笠川（２級河川）

延長：24km

流域面積：94km^2

流域：福岡県

管理：福岡県

（2）データ期間

2005～2007 年の 1 時間データ（10 分データから抽出して使用）

（3）実績水位

山王橋地点の水位観測所データ

表 3-74　観測データ概要

水位観測所	流域面積 (km^2)
山王橋（さんのうばし）	86.7

（4）実績雨量

気象庁レーダーアメダス解析雨量（2.5km メッシュ）

（5）実績気圧、風向、風速

気象庁気象台　福岡地点

（6）天文潮位

気象庁潮位表　下関地点

（７）流域配置図



図 3-214　御笠川流域配置図

3.6.1. 水位予測モデルの構築

気象庁の潮位予測式である式 3-12 を参考として水位予測モデルの入力要素を検討した。

$$\Delta H_s = a(1010 - P) + bV^2 \cos\theta + c \qquad \text{式 3-12}$$

ここで、ΔH_s : 潮位偏差、P : 気圧、V : 風速、θ : 風向 である。

モデルの入力要素として、レーダーアメダス解析雨量、天文潮位、気圧、風向、風速の時間毎データを採用した。水位予測モデルの入出力パターンを式 3-13、式 3-14 に示す。

$$H(t+1) = f\begin{pmatrix} H(t),...,H(t-24), R(t+1),...,R(t-7), L(t+1),...,L(t-25), \\ P(t+1),...,P(t-5), W(t+1),...,W(t-26) \end{pmatrix} \qquad \text{式 3-13}$$

$$W = V^2 \cos\theta \qquad \text{式 3-14}$$

ここで、H : 水位、R : 雨量、L : 天文潮位、P : 気圧、V : 風速、θ : 風向、W : 湾軸方向風圧、t : 時間 である。

なお本解析では、レーダーアメダス解析雨量（2.5km メッシュ）の平均雨量、下関潮位観測所の天文潮位、福岡気象観測所の気圧、風向、風速を使用した。解析に用いた雨量メッシュを図 3-215 に示す。また、メッシュ雨量は 1 要素に単純平均してから入力する「平均雨量モデル」を構築した。学習期間は 2005 年 4 月～2006 年 12 月とし、未知データを 2007 年 1 月～11 月とした。

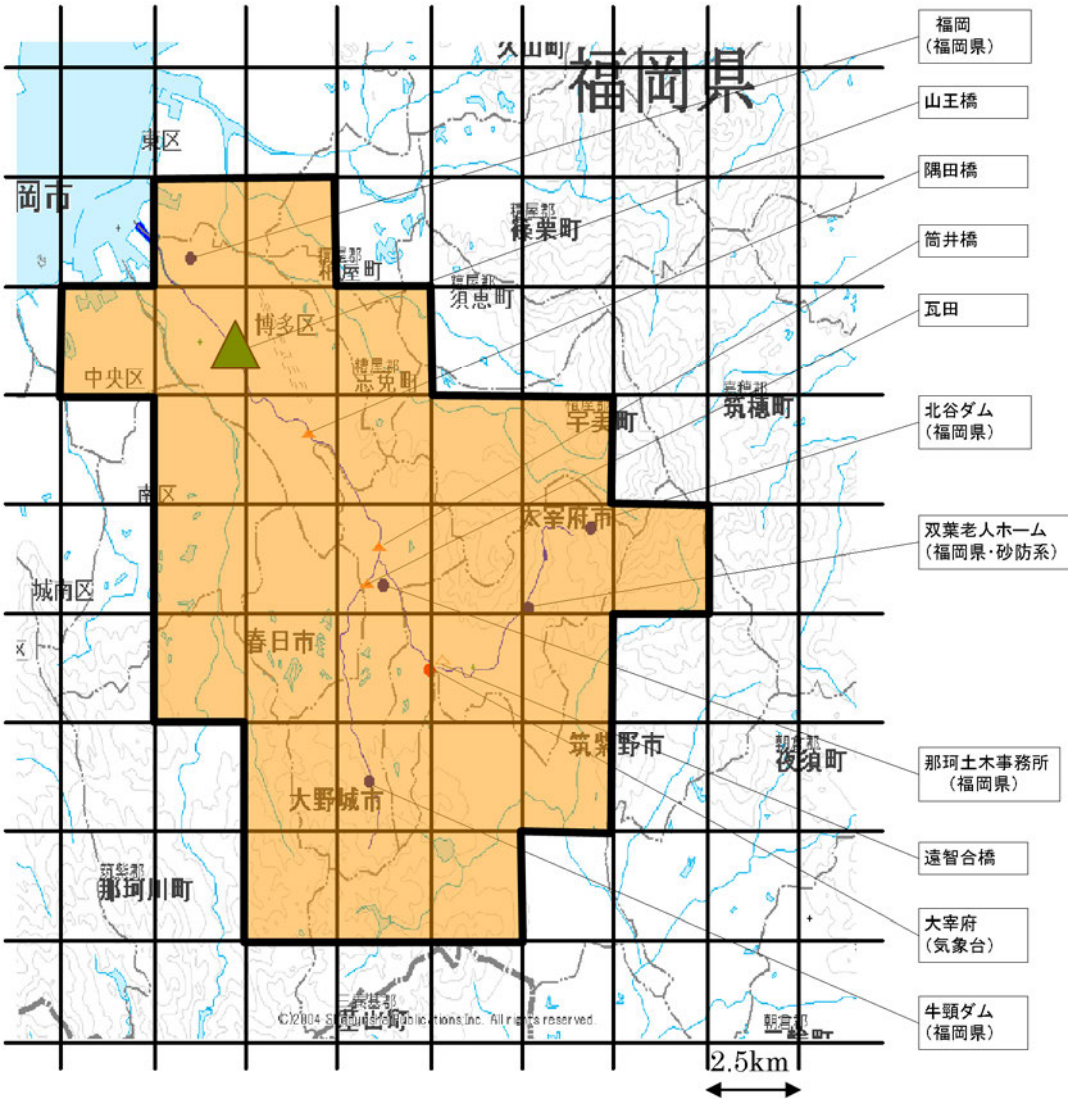


図 3-215　山王橋水位（29 メッシュ）

3.6.2. 学習トレース結果

学習が十分に行われたかを確認するため、学習に用いたデータを用いて水位予測計算を実施した。各観測所における平均雨量モデル予測結果を図 3-216 に示す。

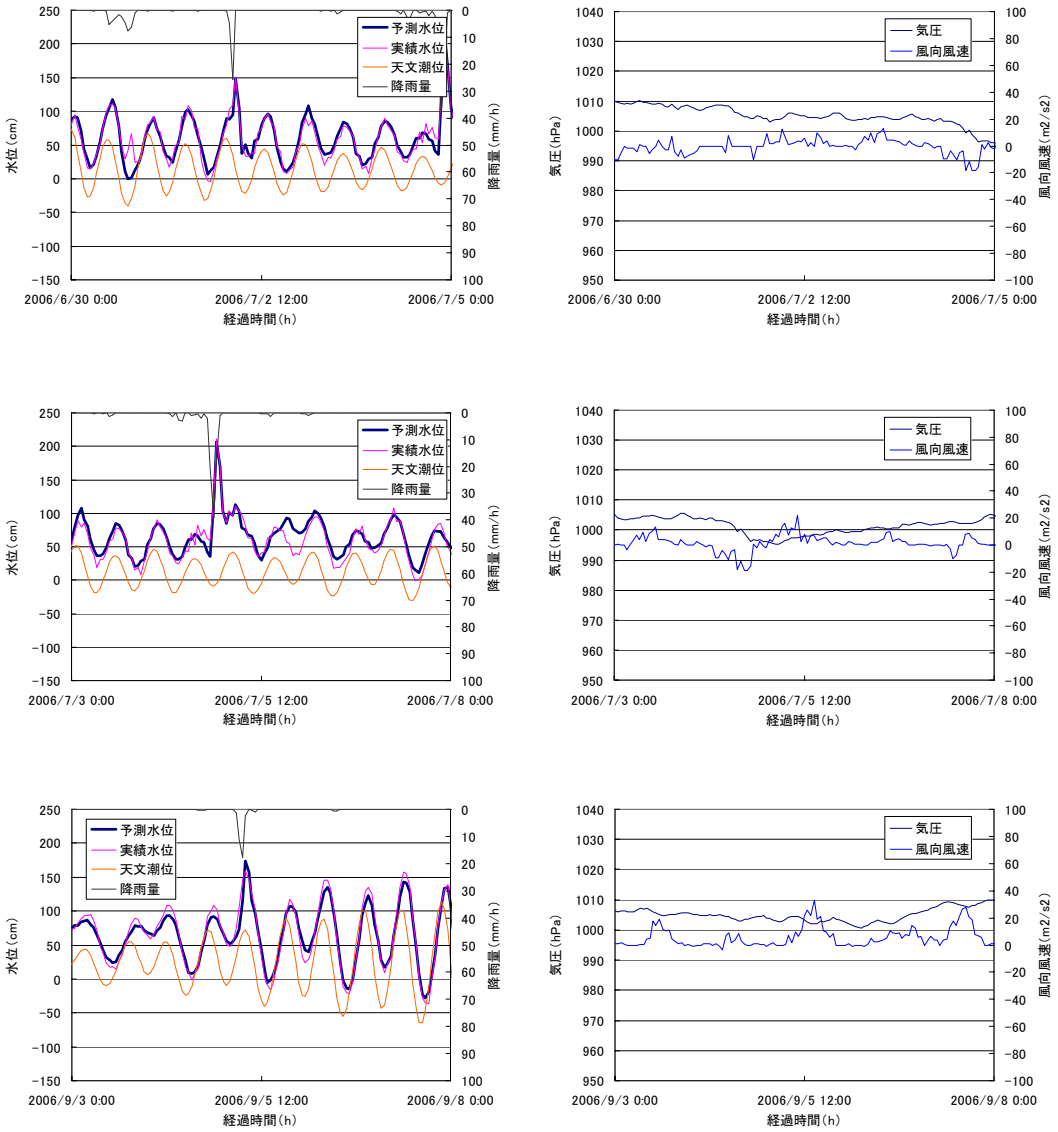


図 3-216　山王橋水位　学習トレース結果（2006 年）

3.6.3. 未知データの予測結果

次にモデルにとっては未知となるデータを用いてモデルの予測計算を実施した結果を図 3-217 に示す。

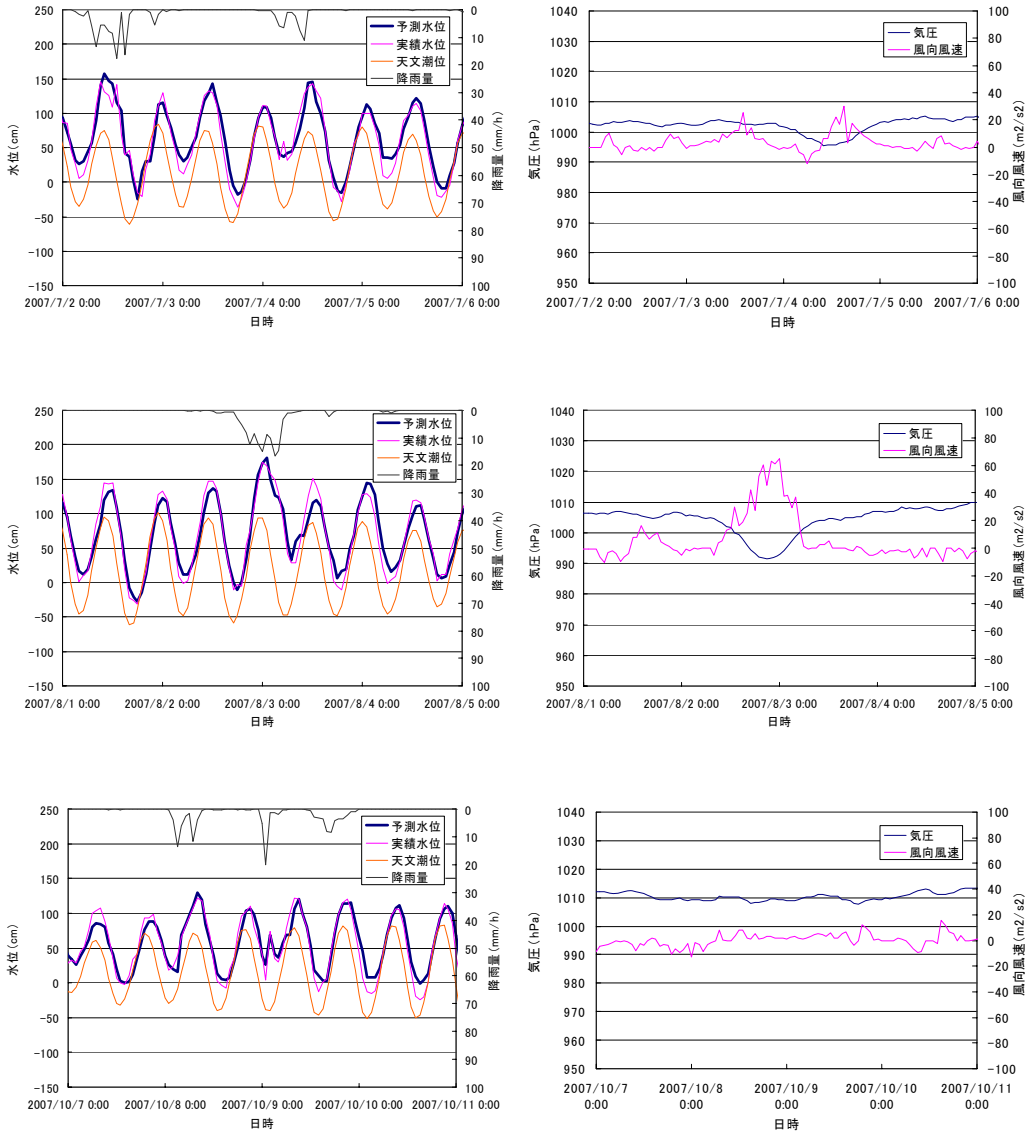


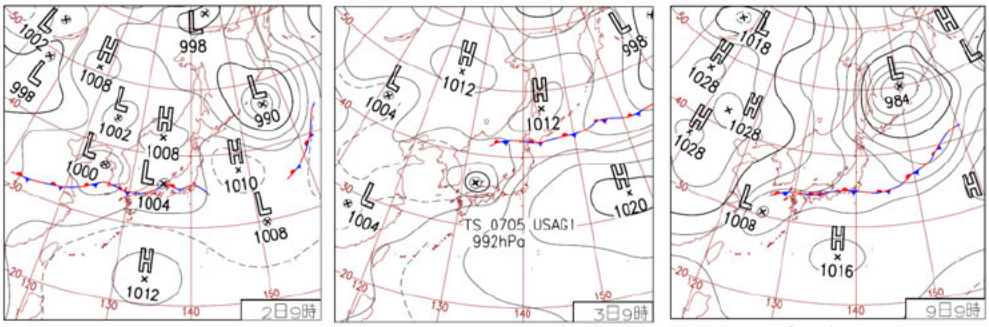
図 3-217　山王橋水位　未知予測結果（2007 年）

3.6.4. ピーク精度評価

未知データの中で規模の大きな出水 3 イベントを抽出し、水位ピーク誤差の精度評価を行った。評価対象とした出水ピークの日時を表 3-75 に示し、天気図を図 3-218 に示す。

表 3-75　各水位観測所の出水ピーク日時

ケース番号	山王橋	気象概況
No.1	2007/7/2 13:00	梅雨前線
No.2	2007/8/3 0:00	台風第 5 号
No.3	2007/10/9 2:00	秋雨前線



2007/7/2　　2007/8/3　　2007/10/9

図 3-218　出水ピーク日の天気図

各水位観測所のピーク精度評価結果を図 3-219 と表 3-76 に示す。No.1 のケースは 2 山ピークの出水で、最大ピークは 26cm 低めに予測されているが、ピーク前後を含めると全体的に高めの予測となっている。No.2 のケースは満潮時に降雨が重なったケースで、ピーク誤差は 1cm 以内と良好な精度で予測できている。No.3 のケースは干潮時に降雨が重なったケースで、6cm 以内のピーク誤差と良好な精度で予測できている。

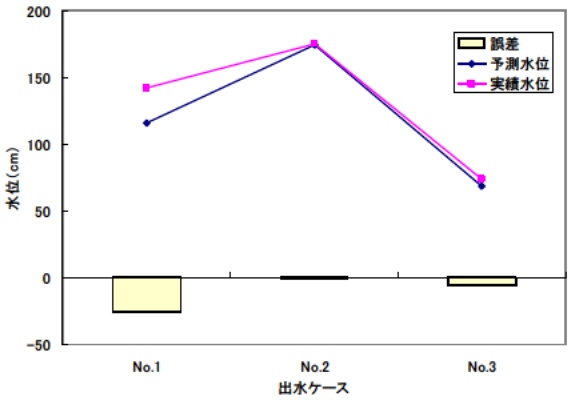


図 3-219　山王橋水位　ピーク精度評価

表 3-76　山王橋水位　ピーク精度評価

ケース番号	予測値(cm)	実績値(cm)	誤差(cm)
No.1	115.9312	142	-26.0688
No.2	174.7566	175	-0.24342
No.3	68.41339	74	-5.58661

3.6.5. まとめ

御笠川の事例では、約 2 年分のデータを用いて山王橋の水位予測モデルを構築し、約 1 年分のデータ用いて予測検証を実施した。御笠川は都市型河川であり、山王橋水位地点は潮汐の影響を受ける感潮域である。本検証では、モデルの入力条件に天文潮位、気圧、風圧を追加してモデルを構築した。未知データの中から 3 出水を抽出し、ピークの精度評価を実施した結果、いずれもピーク誤差が 30cm 未満に収まっており、実用上十分な予測精度であることを確認した。一般的に感潮河川は流量観測が困難であり、また H-Q 曲線が使用できないことから単純な流出解析手法では水位予測が困難とされていたが、本手法の適用により全国の感潮域において水位予測モデルの構築が可能になるものと期待される。

4. モデル特性に関する検証結果

4.1. 洪水到達時間と相互情報量の関係

降雨流出の時間遅れ効果をモデルに取り込むためには、モデル入力要素としてある時間範囲の過去雨量を入力する必要がある。一般的な降雨流出の時間遅れの指標として洪水到達時間が知られているが、これを特定するためには、いくつかの出水を抽出して雨量及び水位のピーク時間差を分析する必要がある。ただし、多様な降雨パターンが含まれる実データを元にして正確な値を算出するためには、水文分野における豊富な知識と経験が不可欠である。本報では、情報工学分野で用いられている時系列データ解析手法である相互情報量解析を用いて、効率的かつ簡便に洪水到達時間相当の値を算出し、それをモデルの過去雨量参照時間とする方法を提案する。本手法は、降雨だけでなくダム放流量や気圧、風圧、天文潮位等の入力要素の過去参照時間を特定することにも適用可能な汎用的な手法である。

本検証では、佐波川、遠賀川、鶴見川の事例を対象として相互情報量解析および洪水到達時間の比較検討を行った。

4.1.1. 洪水到達時間の算出方法

各水位観測所の水位と雨量の実績データから洪水到達時間を算出した。洪水到達時間は、各出水の水位ピーク時刻と雨量ピークの時間差を元に算出した。なお、数値にばらつきが生じることが予想されるため、上位 10 出水のデータを抽出し、各出水の洪水到達時間を平均化したものを対称地点の洪水到達時間とした。洪水到達時間の算出式を式 4-1 に示す．なお雨量のみの影響を考慮するため感潮域の水位観測所は除外した．

$$T = \frac{1}{10}\sum_{k=1}^{10}\left(TH_k - TR_k\right)\times 2 \qquad \text{式 4-1}$$

ここで、T：洪水到達時間、k：出水ケース、TH：水位ピーク時刻、TR：雨量ピーク時刻である．

4.1.2. 雨量と水位の相互情報量解析

雨量と水位のデータを用いて相互情報量解析を実施した結果を図 4-1～図 4-16 に示す．横軸は水位と雨量の時間差を表し、縦軸は水位と雨量の相互情報量の大きさを示している。いずれの水位地点においても、ある時間差において相互情報量の値がピークとなっていることが分かる。

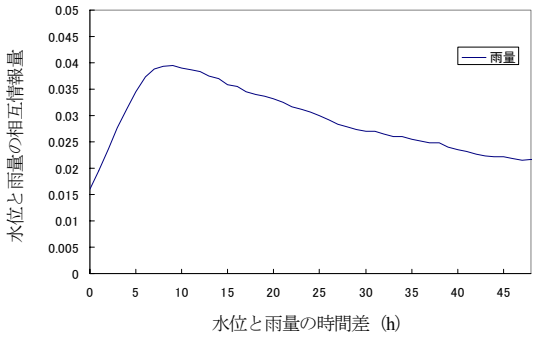


図 4-1　佐波川新橋の相互情報量

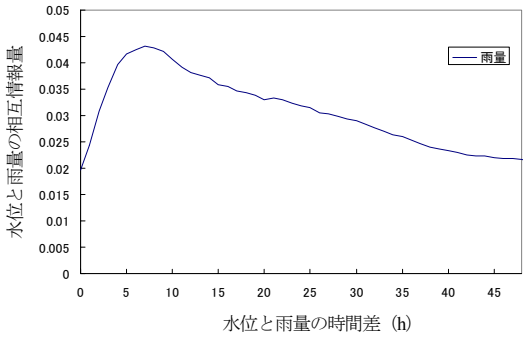


図 4-2　佐波川漆尾の相互情報量

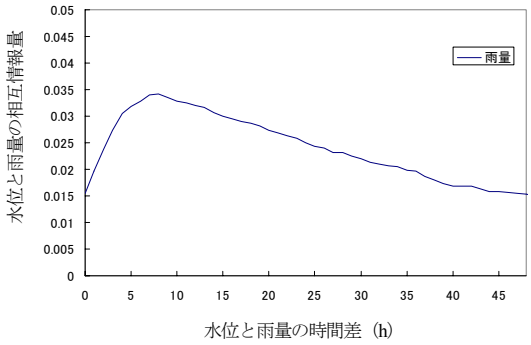


図 4-3　佐波川堀の相互情報量

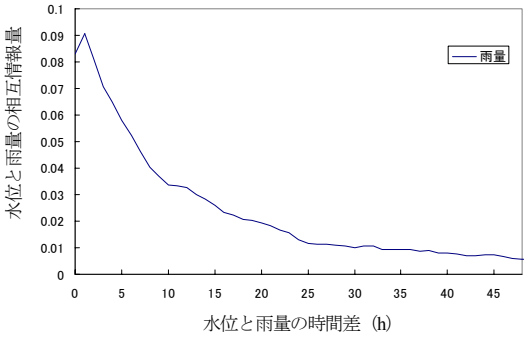


図 4-4　鶴見川寺家橋の相互情報量

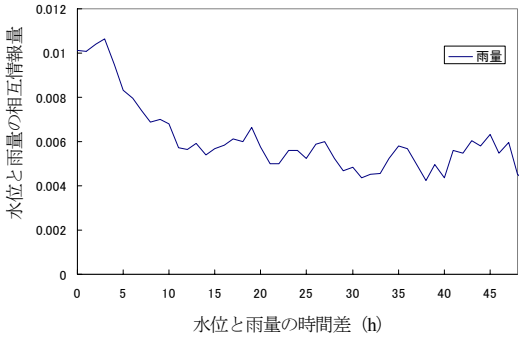


図 4-5　鶴見川末吉橋の相互情報量

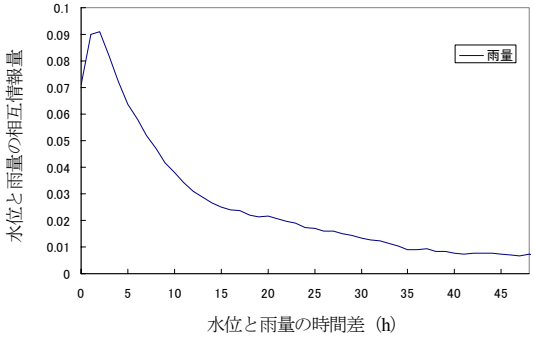


図 4-6　鶴見川落合橋の相互情報量

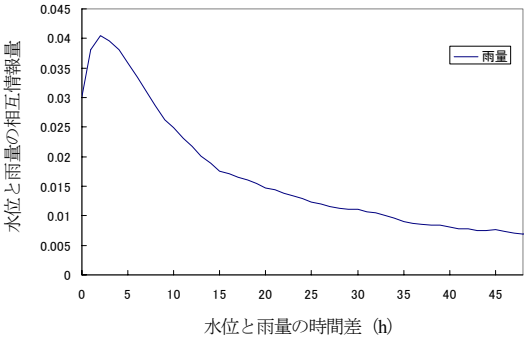


図 4-7　遠賀川夏吉の相互情報量

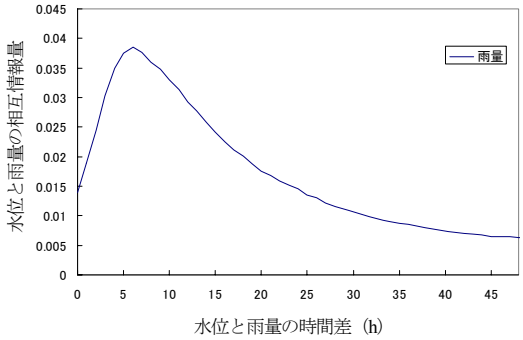


図 4-8　遠賀川勘六橋の相互情報量

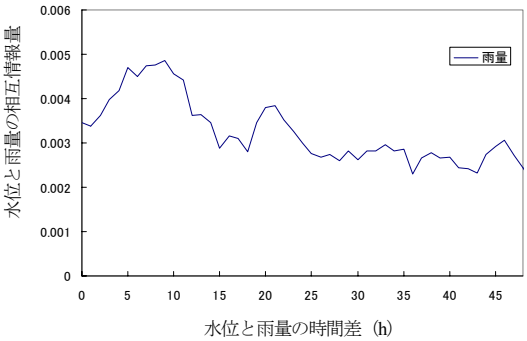


図 4-9　遠賀川祇園橋の相互情報量

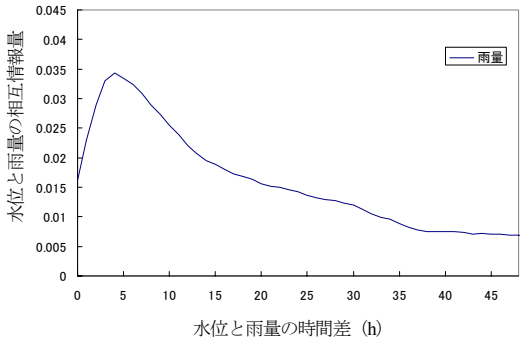


図 4-10　遠賀川宮田橋の相互情報量

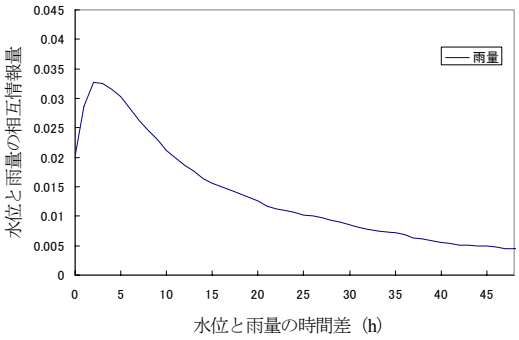


図 4-11　遠賀川秋松橋の相互情報量

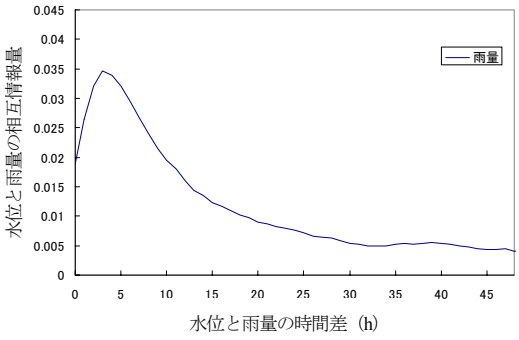


図 4-12　遠賀川川島の相互情報量

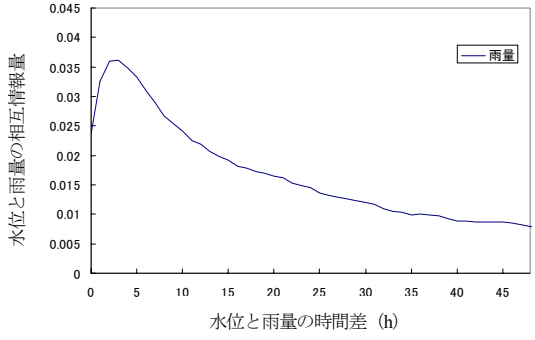


図 4-13　遠賀川大隈の相互情報量

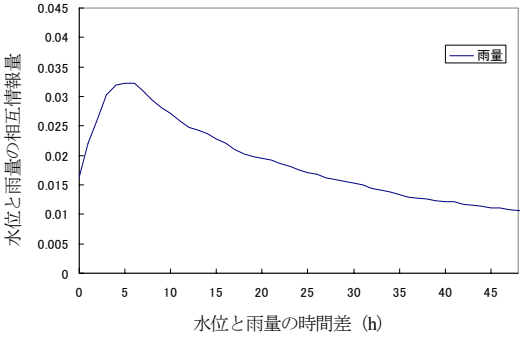


図 4-14　遠賀川添田の相互情報量

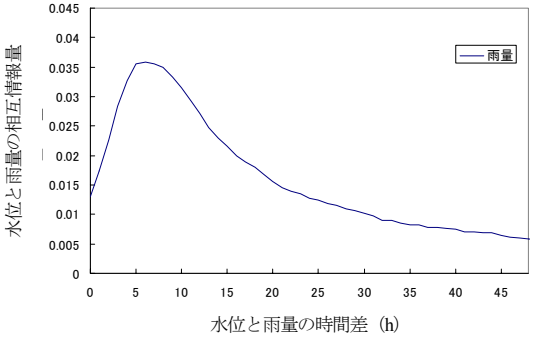


図 4-15　遠賀川日の出橋の相互情報量

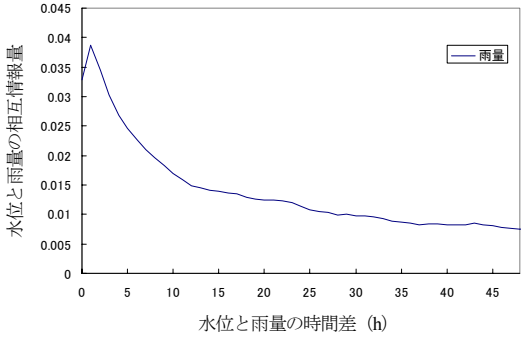


図 4-16　遠賀川野面の相互情報量

4.1.3. 洪水到達時間と相互情報量解析の比較分析

雨量と水位の相互情報量が最大となる時間差と，各水位観測点における 10 出水の洪水到達時間の関係を河川ごとにプロットした結果を図 4-17～図 4-19、表 4-1～表 4-3 に示す．同一の水位観測所において一意に定まる相互情報量ピークの時間差に対し，10 出水の洪水到達時間は大きく分散することが分かる．

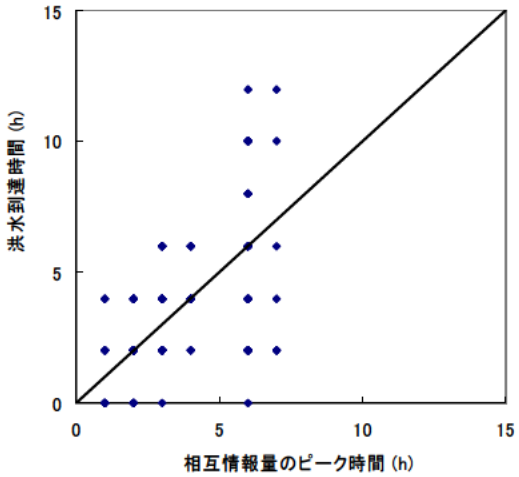


図 4-17　遠賀川の洪水到達時間と相互情報量のピーク時間

表 4-1　遠賀川の洪水到達時間と相互情報量のピーク時間

観測所	相互情報量のピーク時間	洪水到達時間	観測所	相互情報量のピーク時間	洪水到達時間
夏吉	2	2	大隈	3	2
		0			2
		0			2
		2			4
		4			2
		2			4
		0			2
		2			0
		2			2
		2			2
勘六橋	6	6	添田	6	2
		2			4
		4			4
		6			2
		10			2
		10			2
		0			18
		10			22
		2			8

		8			2
宮田橋	4	4	日の出橋	6	6
		4			2
		4			6
		6			4
		2			6
		6			10
		4			10
		4			10
		6			12
		2			8
秋松橋	2	2	野面	1	0
		2			2
		0			2
		2			0
		2			4
		2			0
		4			4
		4			2
		4			2
		4			0
川島	3	4			
		4			
		4			
		2			
		4			
		6			
		6			
		6			
		6			
		4			

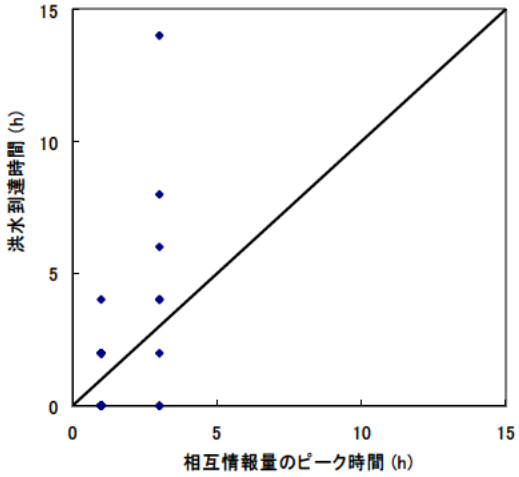


図 4-18　鶴見川の洪水到達時間と相互情報量のピーク時間

表 4-2　鶴見川の洪水到達時間と相互情報量のピーク時間

観測所	相互情報量のピーク時間	洪水到達時間	観測所	相互情報量のピーク時間	洪水到達時間
寺家橋	1	0	落合橋	1	2
		0			2
		2			2
		0			0
		0			0
		0			0
		0			0
		0			4
		2			0
		0			2
末吉橋	3	0			
		4			
		0			
		8			
		14			
		4			
		0			
		6			
		2			
		4			

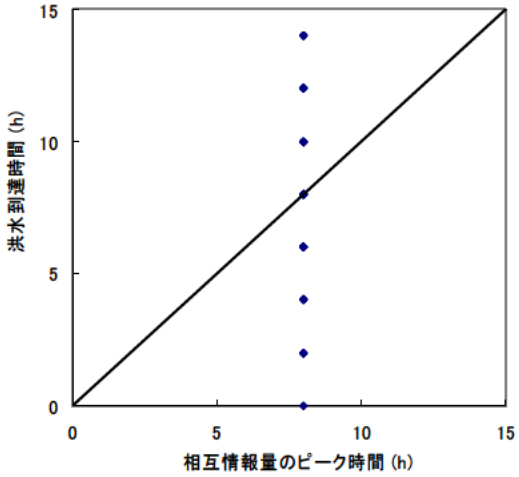


図 4-19　佐波川の洪水到達時間と相互情報量のピーク時間

表 4-3　佐波川の洪水到達時間と相互情報量のピーク時間

観測所	相互情報量のピーク時間	洪水到達時間	観測所	相互情報量のピーク時間	洪水到達時間
漆尾	8	8	堀	8	4
		10			10
		4			10
		0			2
		10			12
		4			6
		6			2
		14			12
		4			6
		6			14
新橋	8	8			
		10			
		8			
		8			
		8			
		2			
		8			
		6			
		12			
		14			

そこで，洪水到達時間を水位観測点ごとに平均化し，相互情報量ピークの時間差と平均化した洪水到達時間を河川ごとにプロットした．その結果を図 4-20～図 4-22 に示す．いずれの観測所についても洪水到達時間と相互情報量ピークの時間差がほぼ同じであることが分かる．したがって相互情報量解析の結果から推定される雨量の影響時間は、物理モデルの観点から推定される洪水到達時間の期待値と同等であると考えられる．

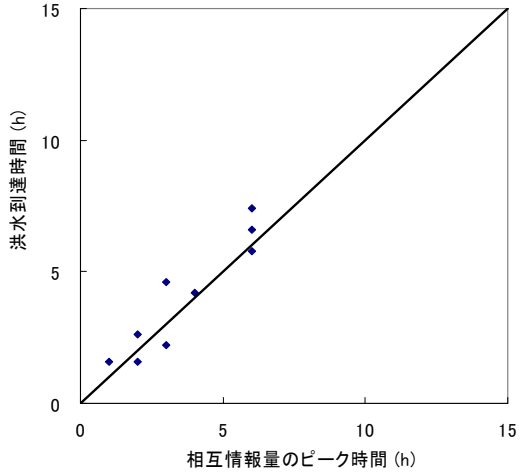


図 4-20　遠賀川の洪水到達時間と相互情報量のピーク時間

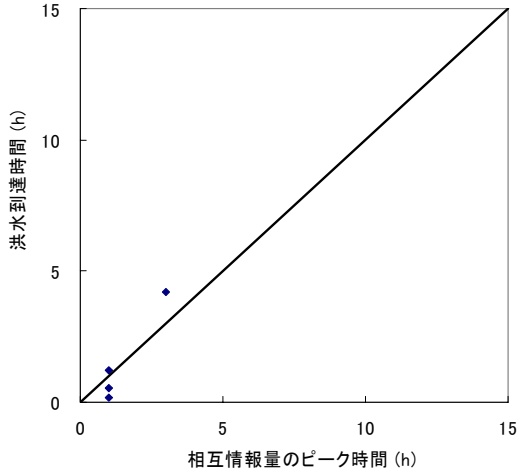


図 4-21　鶴見川の洪水到達時間と相互情報量のピーク時間

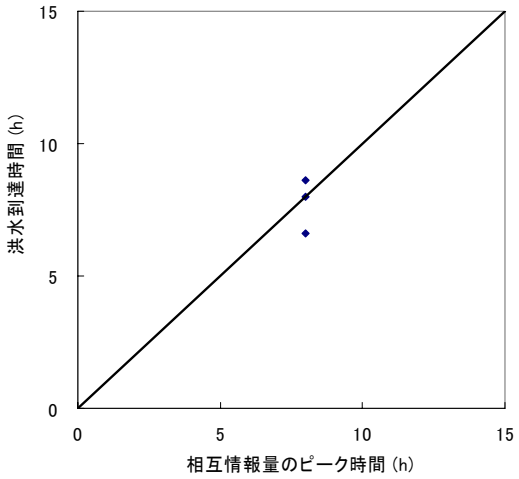


図 4-22　佐波川の洪水到達時間と相互情報量のピーク時間

4.1.4. まとめ

降雨の流出遅れの効果を予測に反映させるため、モデルの入力変数として、予測開始時刻の雨量だけでなく、ある時間範囲の過去雨量も追加する必要がある。流出遅れに関する水文学的指標として洪水到達時間が知られているが、これを求めるためには、対象出水の選別や雨量/水位ピークの判別等、水文学における豊富な経験と高度な専門知識が必要となる。そこで本検証では、情報工学分野の観点から相互情報量解析による洪水到達時間の決定方法を提案し、水文学的な洪水到達時間との比較分析を行った。ここでは、佐波川、鶴見川、遠賀川の各水位観測地点を対象とし、相互情報量解析から推定される洪水到達時間と水文学的観点から推定される洪水到達時間を比較した。情報工学的な方法では、低水から高水を含む数年分のデータを用いて相互情報量解析を実施し、水位に対する雨量の情報量が最大となる時間差を洪水到達時間とした。一方、水文学的な方法では、主要な 10 出水を対象とし、各出水の雨量ピークと水位ピークの時間差を 2 倍し、この平均値を洪水到達時間とした。その結果、全ての水位観測地点において、いずれの方法についても同程度の洪水到達時間となることを確認した。相互情報量解析を適用することにより、人的な判断を伴うことなく、客観的かつ効率的に河川流域ごとの洪水到達時間を算出することが可能となる。

4.2. 水位過去参照時間の検証

水位/流量の予測計算を実行する場合には、水位/流量の初期値が必要となる。例えば 1 階微分方程式を離散化した場合を考えると、式 4-2 では時刻 $t+\Delta t$ の値を計算するために時刻 t の初期値が必要となる。

$$f(t+\Delta t) = f(t) + \frac{df}{dt}\Delta t \qquad \text{式 4-2}$$

2 階、3 階と次元が高くなれば、差分式を作成すれば分かるように、より過去の初期値を参照する必要がある。そこで本章では、草木ダムと佐波川の事例を対象に、水位/流量予測モデルの入力要素の一つである初期水位/流量の過去参照時間について検討を行った。

4.2.1. 草木ダム及び佐波川の水位過去参照時間の比較

本解析で用いた各地点のモデル式を式 4-3、式 4-4 に示す。草木ダムの流量過去参照時間については 1,3,10 時間の 3 ケースを比較し、佐波川新橋の水位過去参照時間については 1,3,15 時間の 3 ケースを比較した。なお、ここでは、流量あるいは水位以外の要素である降雨量やダム放流量の過去参照時間は固定とし、学習と予測に用いたデータも 3.1、3.2 章で検証したものと同一とした。

$$Q(t+1) = f\left(Q(t),\ldots,Q(t-t_Q+1),R\right) \qquad \text{式 4-3}$$

$$H(t+1) = f\left(H(t),\ldots,H(t-t_H+1),R,D\right) \qquad \text{式 4-4}$$

ここで、Q：ダム流入量、H：佐波川新橋地点の水位、R：降雨量、D：ダム放流量、t：時間、t_Q：流量過去参照時間、t_H：水位過去参照時間である。

草木ダム及び佐波川の主な予測結果を図 4-23～図 4-28 に示す。流量及び水位の過去参照時間が増加するほど予測誤差が増大することが確認できる。表 4-4、表 4-5 に過去参照時間の違いによる未知データの予測誤差（RMSE）を示す。草木ダム、佐波川ダムのいずれのモデルについても、過去参照時間が 1 時間の場合に最も誤差が小さくなることが分かる。一方、防災上の観点からは予測が高めに外れる方が安全上望ましいと考えられるため、佐波川新橋のモデルでは過去参照時間 15 時間のケースを採用するという判断が望ましい。4.1 章の結果から、洪水到達時間は流域規模に依存することが明らかとなっており、本解析の結果においても流域規模に応じた適切な過去参照時間が存在することが分かった。

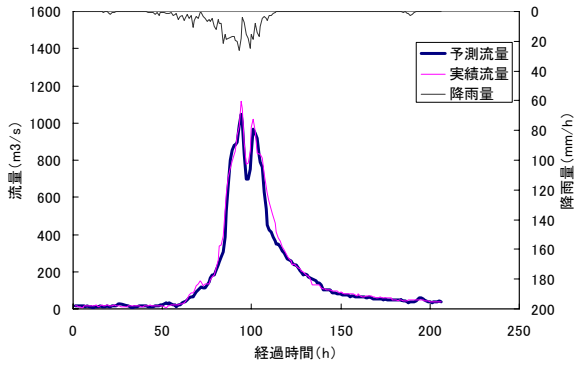


図 4-23　草木ダムの未知予測結果（初期流量の過去参照時間 1h）

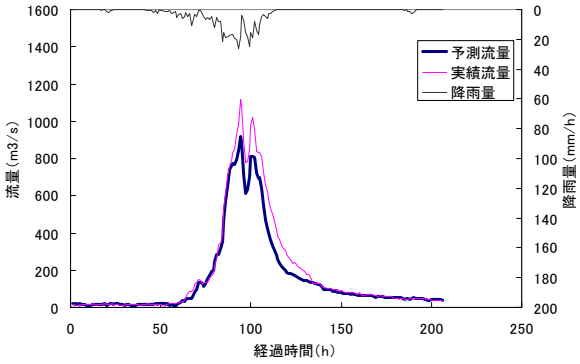


図 4-24　草木ダムの未知予測結果（初期流量の過去参照時間 3h）

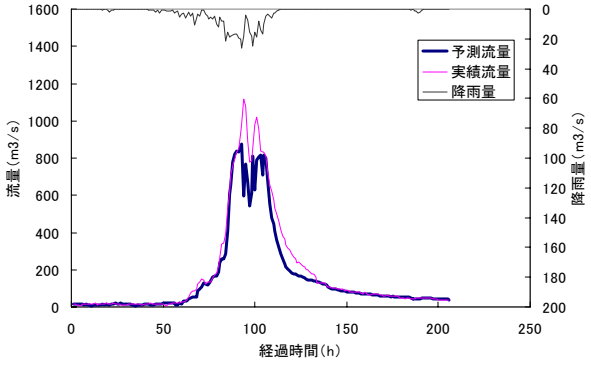


図 4-25　草木ダムの未知予測結果（初期流量の過去参照時間 10h）

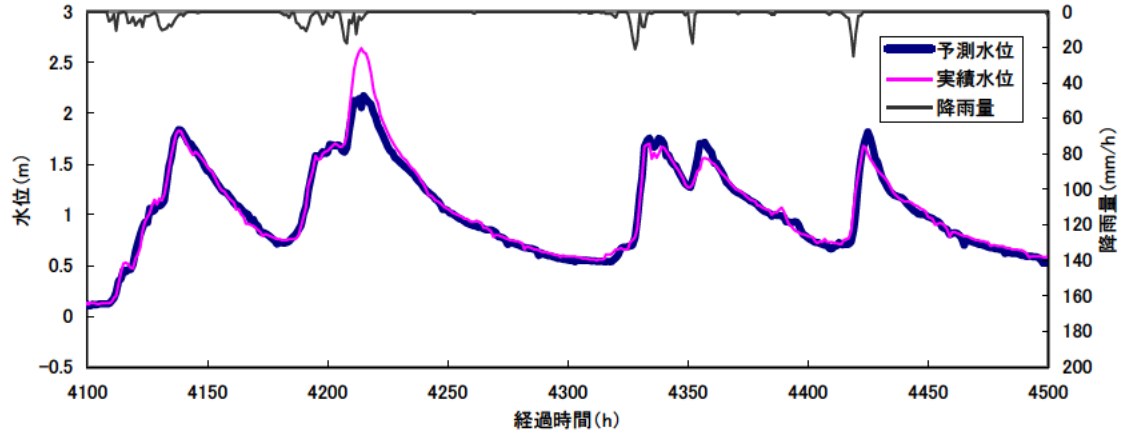


図 4-26　佐波川新橋の未知予測結果（初期水位の過去参照時間 1h）

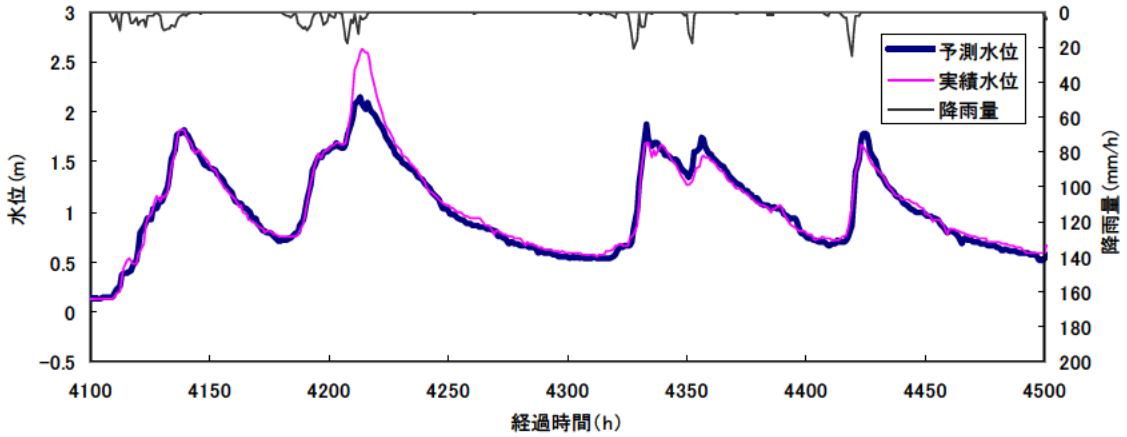


図 4-27　佐波川新橋の未知予測結果（初期水位の過去参照時間 3h）

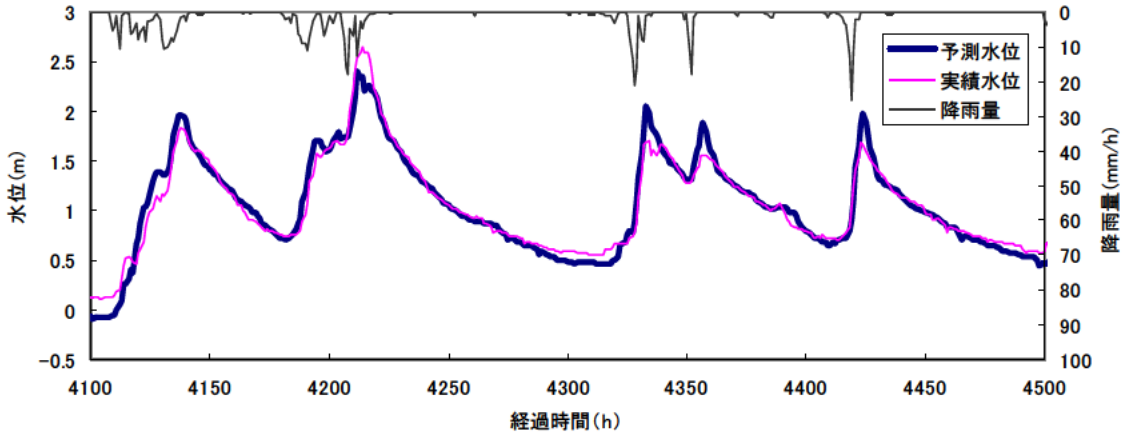


図 4-28　佐波川新橋の未知予測結果（初期水位の過去参照時間 15h）

表 4-4　草木ダムモデルの流量過去参照時間と RMSE

過去参照時間（h）	全データ RMSE（m^3/s）
1	23.12134
3	24.37719
10	43.68328

表 4-5　佐波川新橋モデルの水位過去参照時間と RMSE

過去参照時間（h）	全データ RMSE（m）
1	0.04288
3	0.047012
15	0.147731

4.2.2. まとめ

初期条件としての水位（あるいは流量）の入力方法について検討を行った。予測開始時刻の水位だけでなく、ある時間範囲の過去水位も追加することにより予測精度を向上できるかを検証した。ここでは、草木ダムおよび佐波川の事例を対象に、初期水位の過去参照時間の違いによる予測精度への影響を評価した。

草木ダム、佐波川の RMSE 評価によると、過去参照時間を 1 時間、すなわち現在水位のみ初期条件としたモデルが最も精度が高くなることを確認した。ただし佐波川においては、ピークの予測精度に着目すると過去参照時間を 15 時間としたモデルが最適であると考えられる。本検証の結果、雨量の過去参照時間の検証結果と同様、流域に応じて適切な初期条件の参照時間が存在することが分かった。

4.3. 平均雨量とメッシュ雨量を組み合わせたモデル検証

未知データの予測検証では平均雨量を用いたモデルの方が予測誤差が小さくなるケースが多いことを確認したが、一方で流域面積の大きい水位観測所では雨量の平均化により雨量分布の情報が失われるため予測誤差が大きくなるケースも確認された。本検証では、平均雨量モデルとメッシュ雨量モデルの特長を併せ持つ「分割平均雨量モデル」を提案する。分割平均雨量モデルは、水位観測所に近い領域は雨量をメッシュで入力し、水位観測所から離れた領域は雨量を平均化して入力するモデルである。水位観測所に近い雨量は直接流出の影響が強いため、離れた流域よりも細かなメッシュで入力した。流域面積の大きい遠賀川の日の出橋、祇園橋、勘六橋、川島水位と、佐波川の新橋水位を解析対象とし、分割平均雨量モデルの精度検証を行った。

4.3.1. 分割平均雨量モデルの比較

メッシュ雨量を全て平均化したケースから、全てメッシュのままとしたケースまで、複数の分割パターンを設定し、比較分析を行った。水位観測所ごとに設定した分割パターンを図 4-29～図 4-33 に示す。この設定に基づき未知データの 6 時間先を予測した結果を図 4-34～図 4-66 に示す。

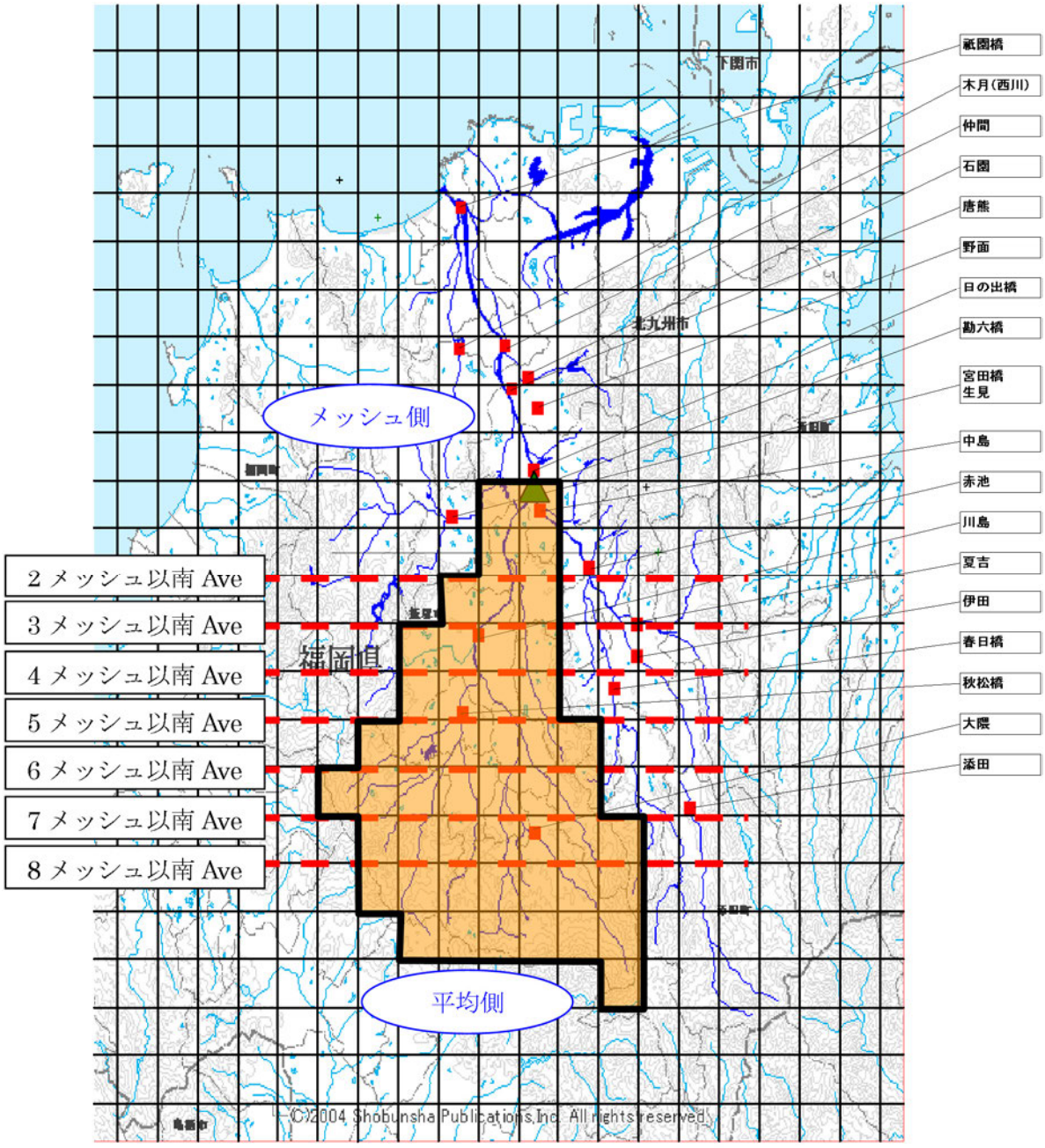


図 4-29　勘六橋水位　雨量分割パターン

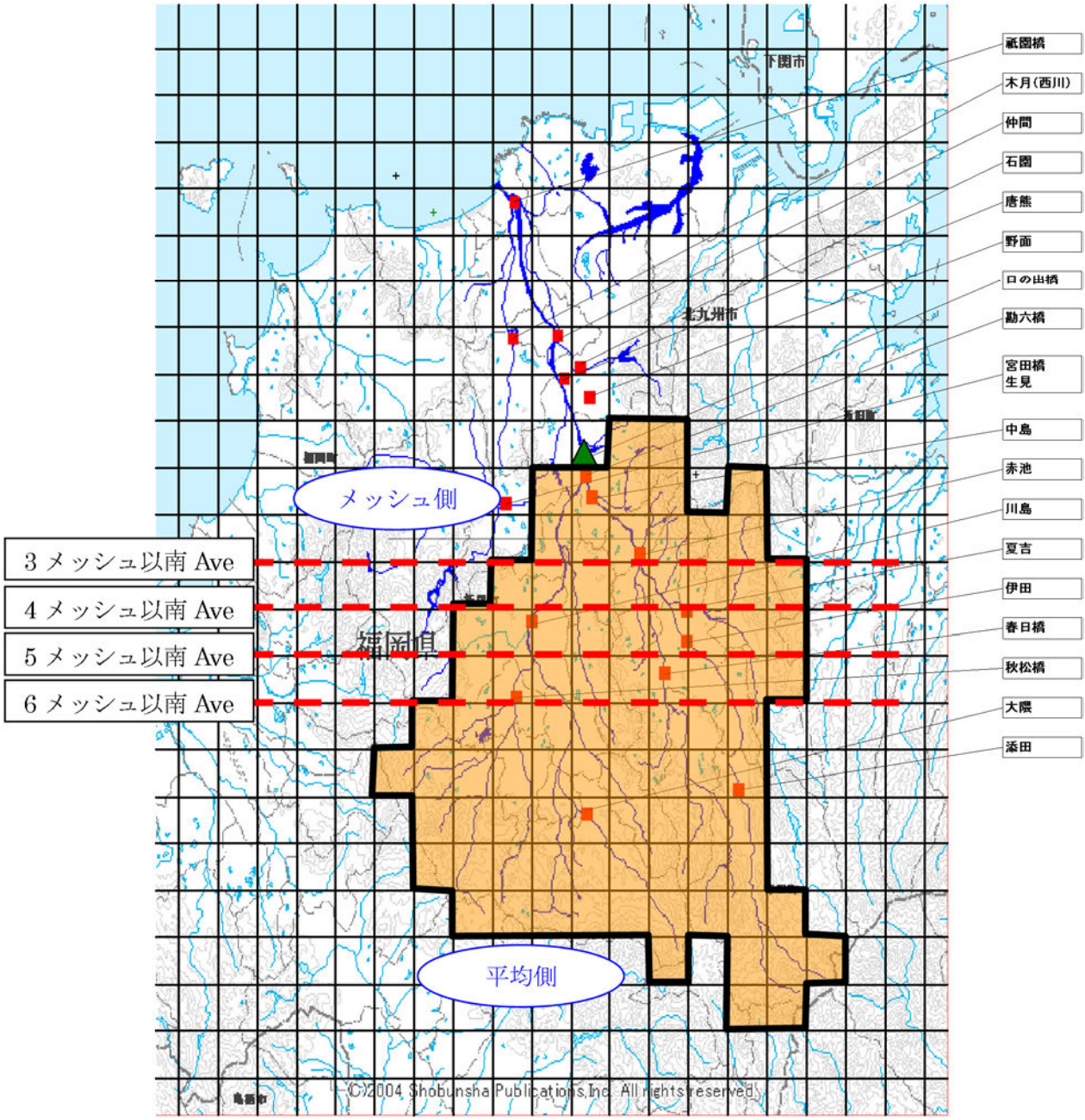


図 4-30　日の出橋水位　雨量分割パターン

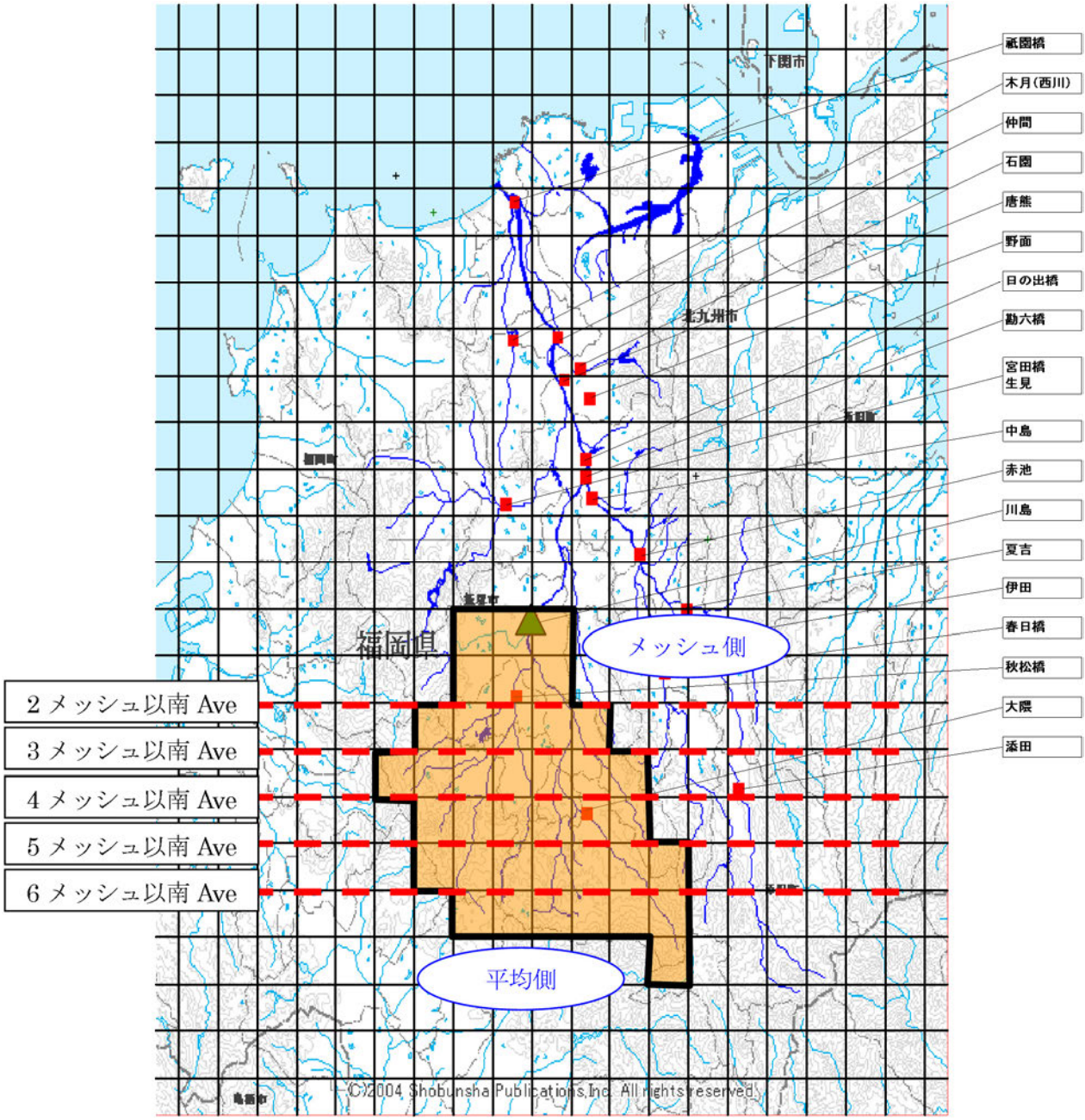


図 4-31　川島水位　雨量分割パターン

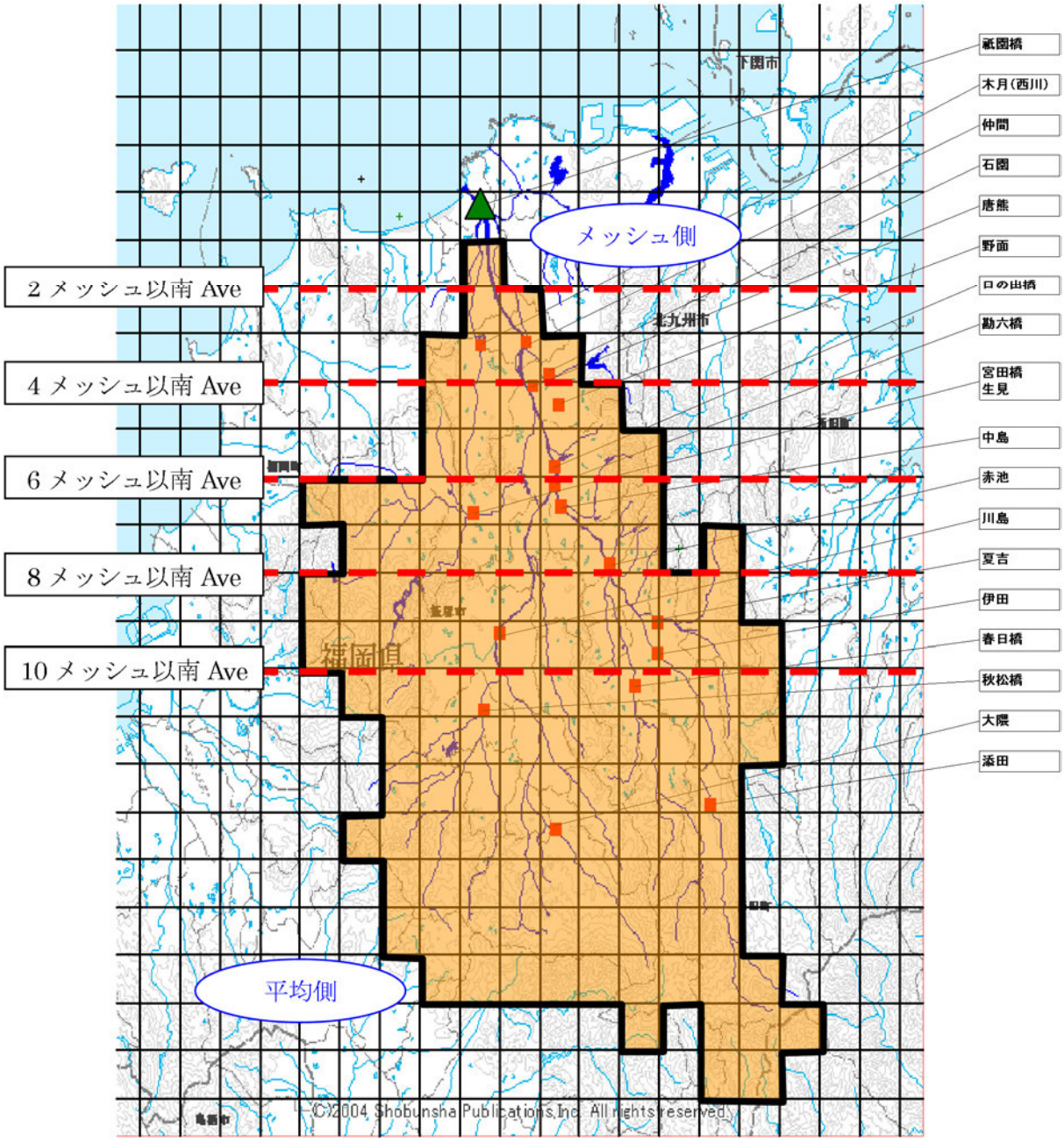


図 4-32　祇園橋水位　雨量分割パターン

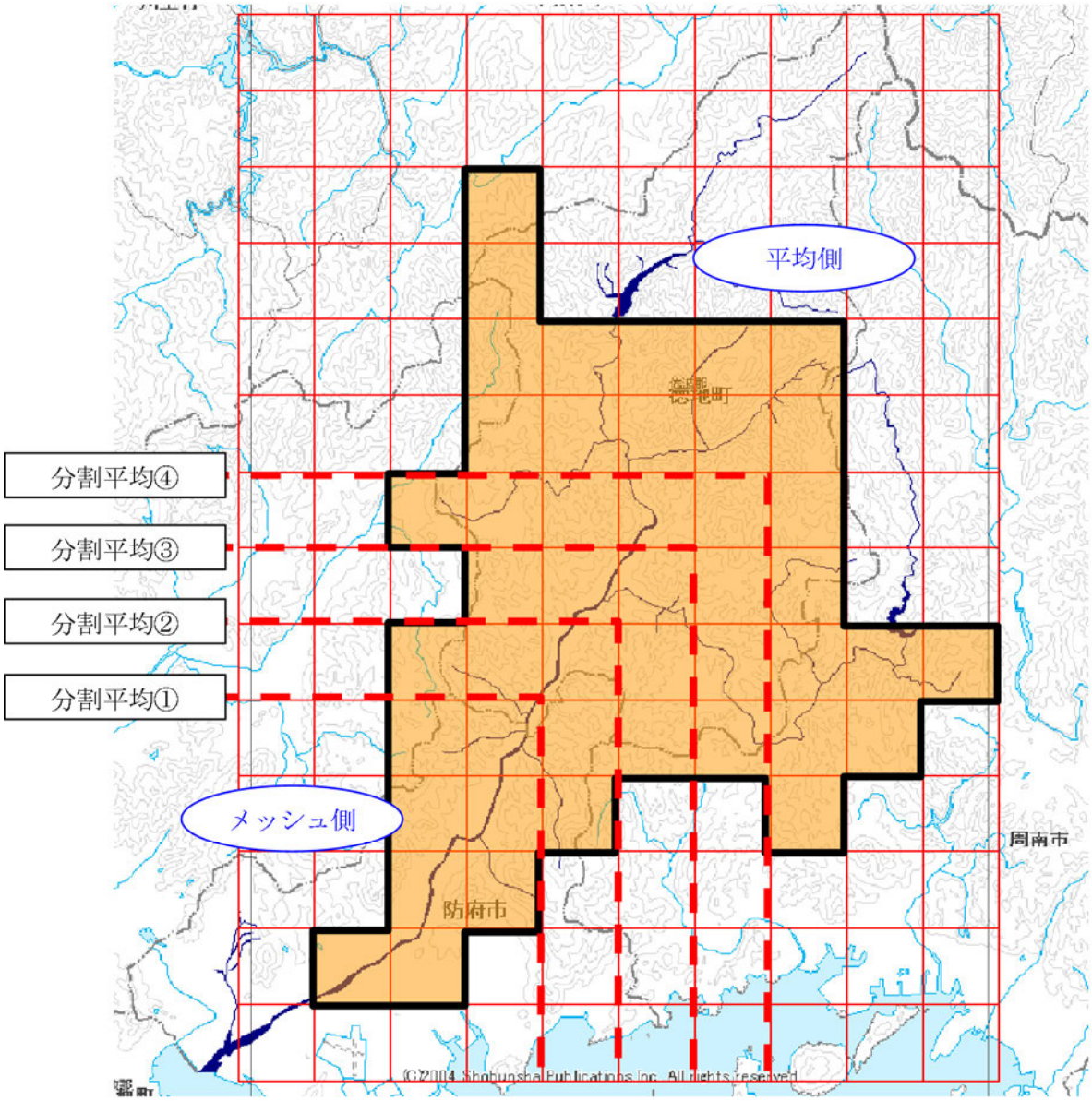


図 4-33　新橋水位　雨量分割パターン

（1）勘六橋

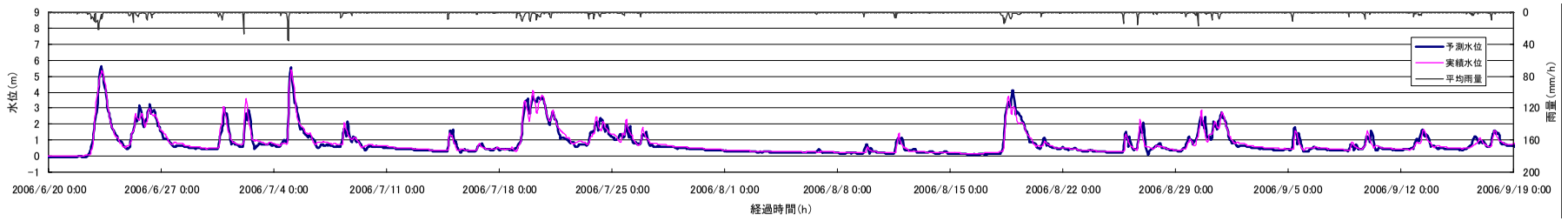


図 4-34　勘六橋水位（平均雨量）

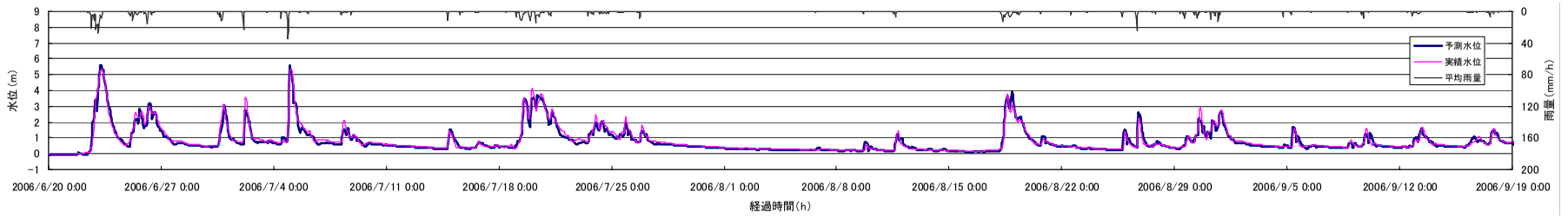


図 4-35　勘六橋水位（2 メッシュ以南 Ave）

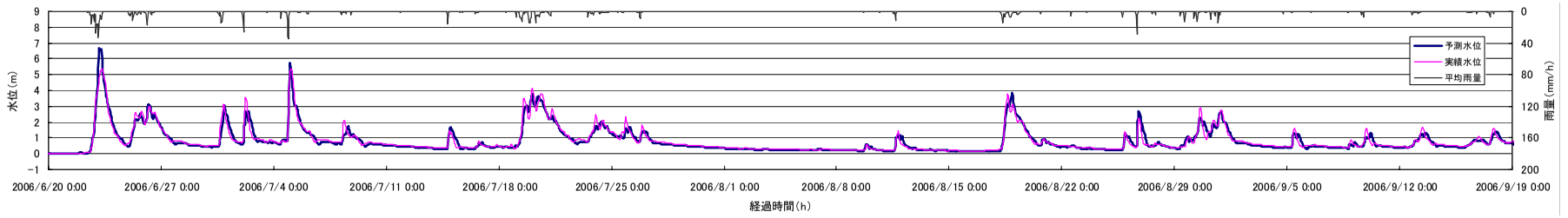


図 4-36　勘六橋水位（4 メッシュ以南 Ave）

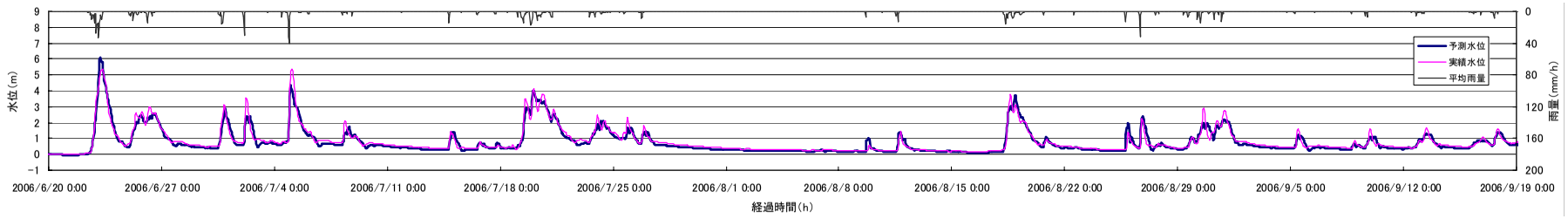


図 4-37　勘六橋水位（南北 6 以南 Ave）

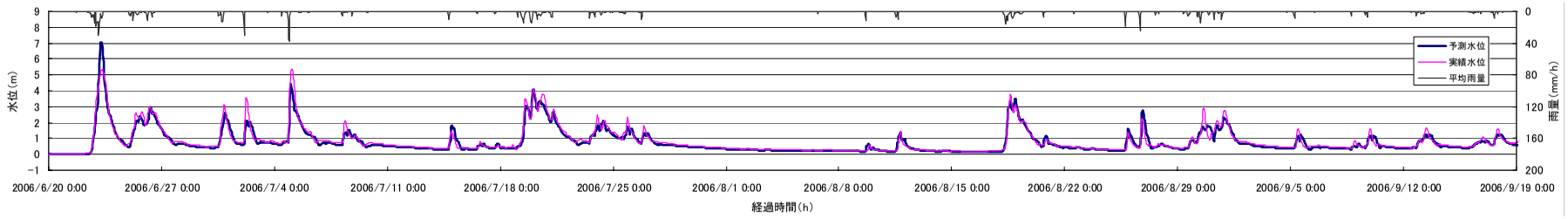


図 4-38　勘六橋水位（南北 8 以南 Ave）

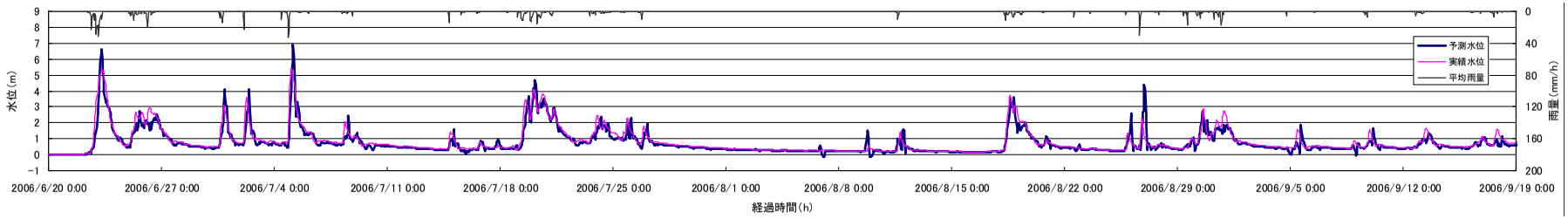


図 4-39　勘六橋水位（メッシュ雨量）

（２）祇園橋

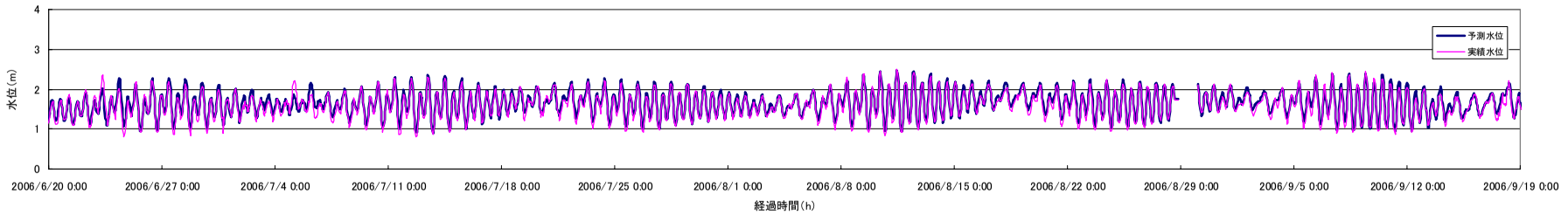


図 4-40　祇園橋水位（雨量なし）

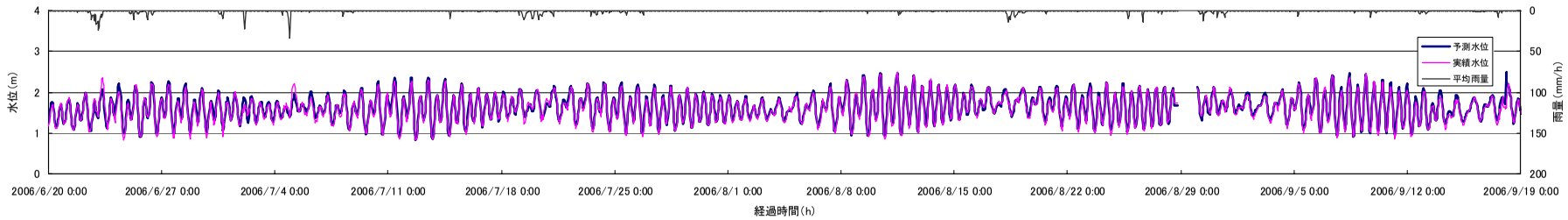


図 4-41　祇園橋水位（平均雨量）

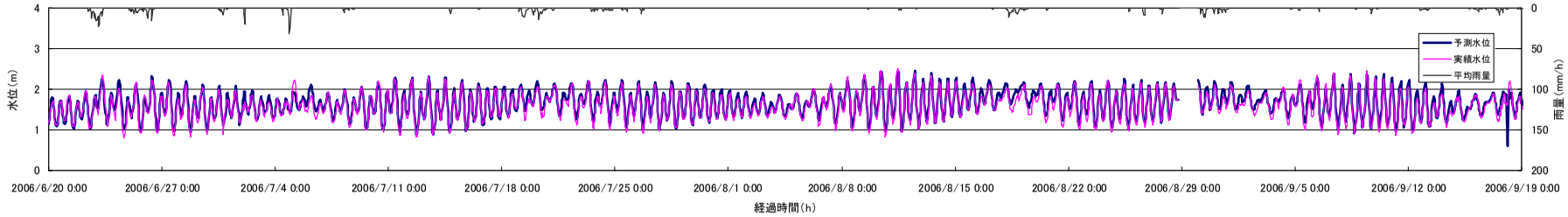


図 4-42　祇園橋水位（２メッシュ以南 Ave）

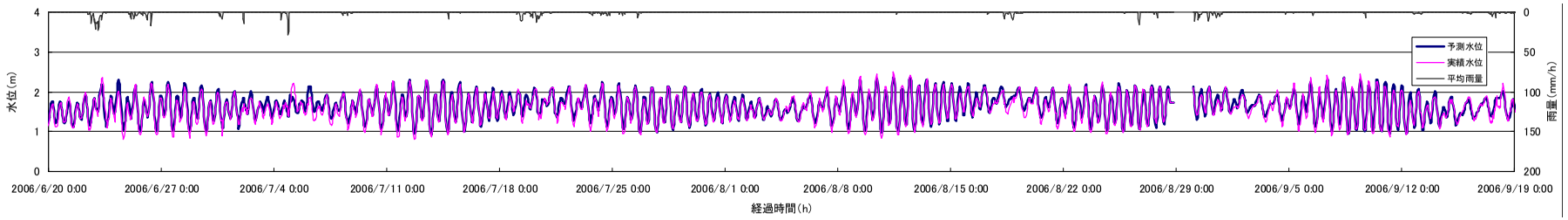


図 4-43　祇園橋水位（４メッシュ以南 Ave）

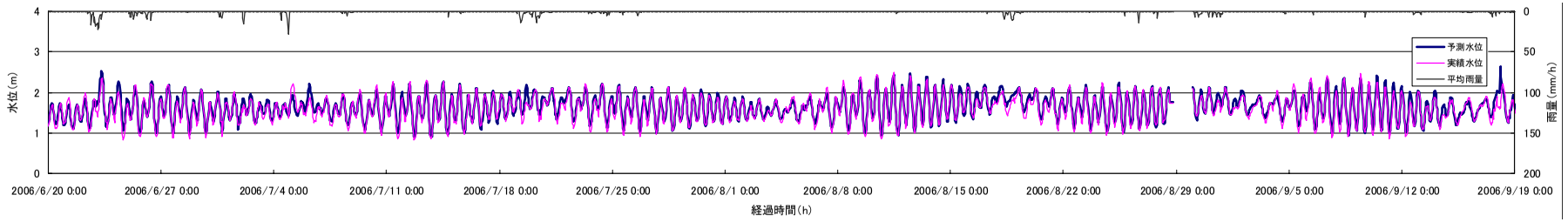


図 4-44　祇園橋水位（６メッシュ以南 Ave）

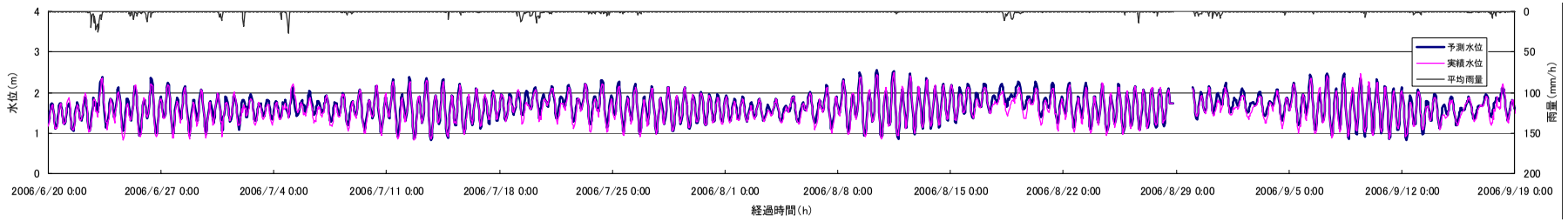


図 4-45　祇園橋水位（８メッシュ以南 Ave）

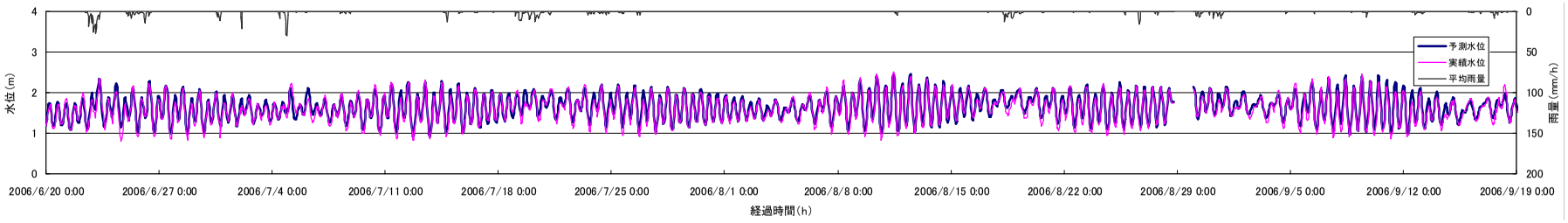


図 4-46　祇園橋水位（１０メッシュ以南 Ave）

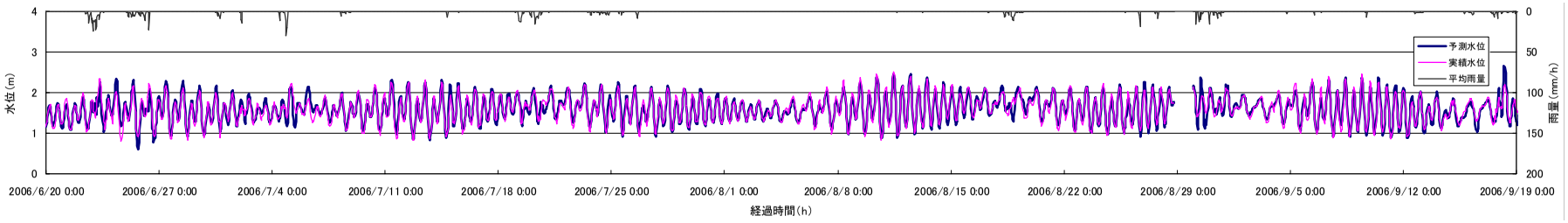


図 4-47　祇園橋水位（メッシュ雨量）

（３）川島

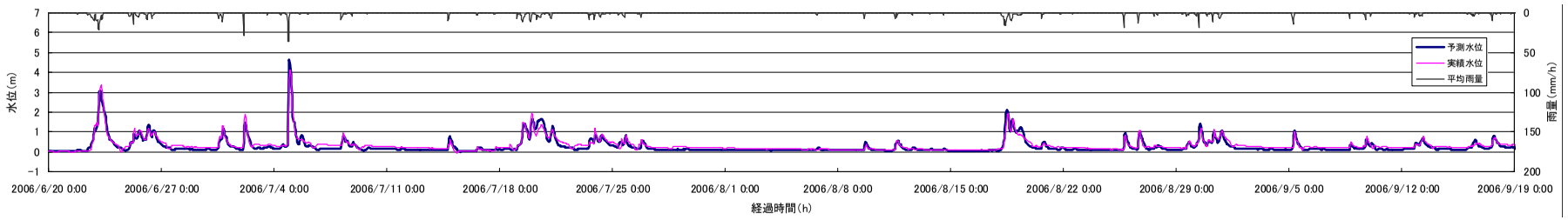


図 4-48　川島水位（平均雨量）

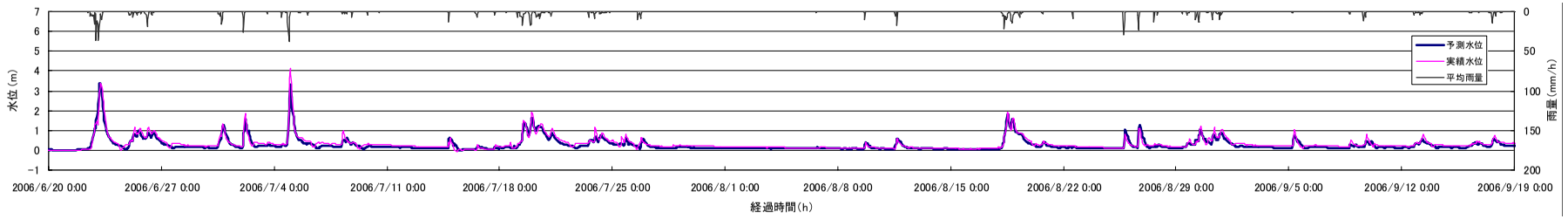


図 4-49　川島水位（２メッシュ以南 Ave）

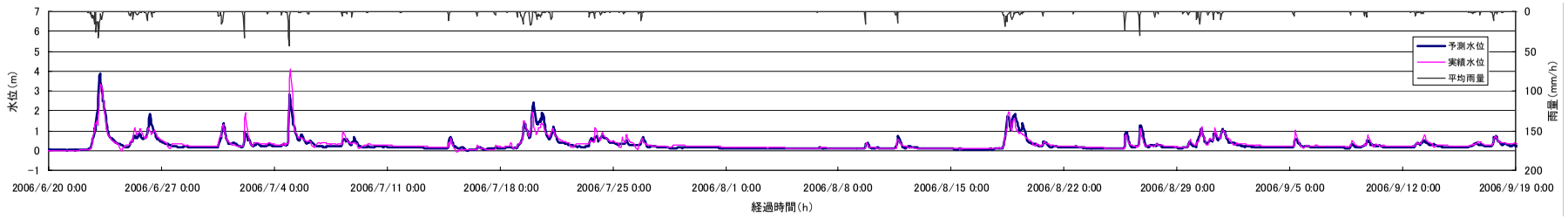


図 4-50　川島水位（３メッシュ以南 Ave）

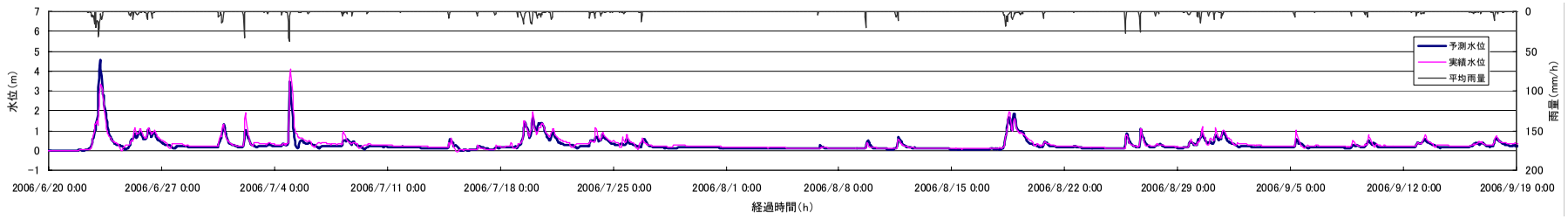


図 4-51　川島水位（４メッシュ以南 Ave）

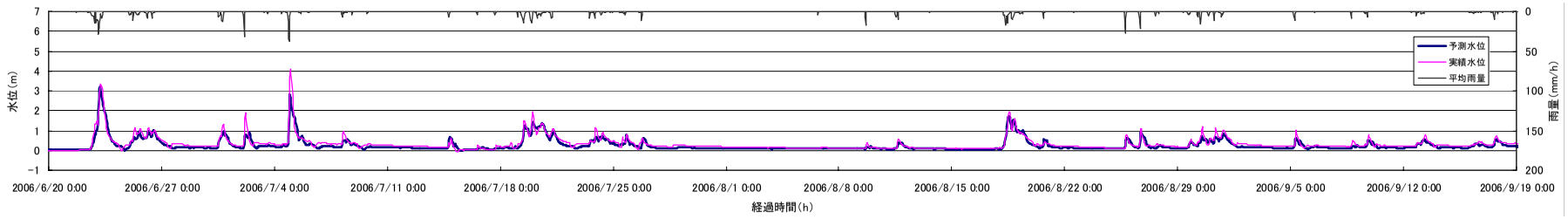


図 4-52　川島水位（５メッシュ以南 Ave）

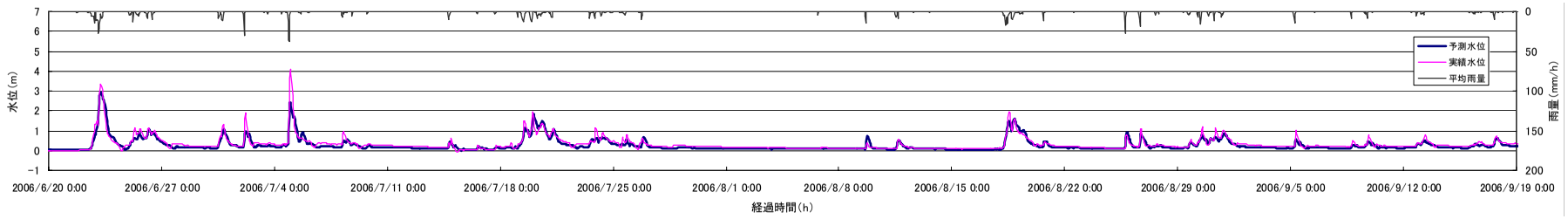


図 4-53　川島水位（６メッシュ以南 Ave）

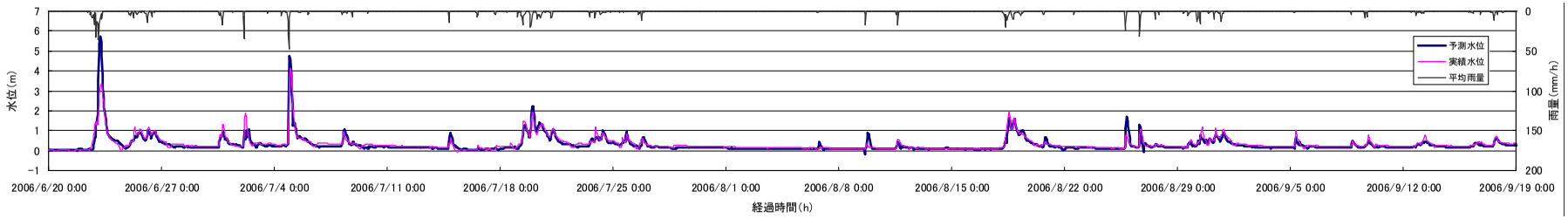


図 4-54　川島水位（メッシュ雨量）

（４）日の出橋

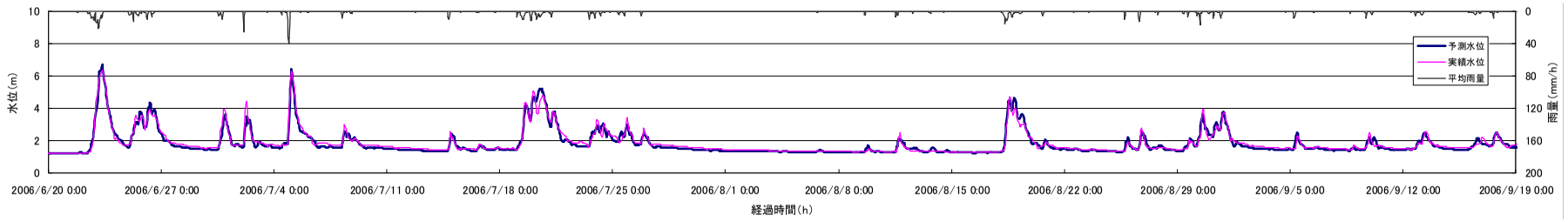


図 4-55　日の出橋水位（平均雨量）

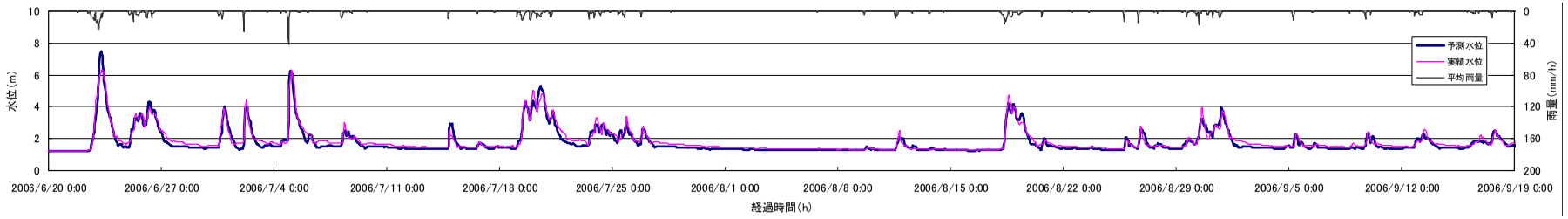


図 4-56　日の出水位（３メッシュ以南 Ave）

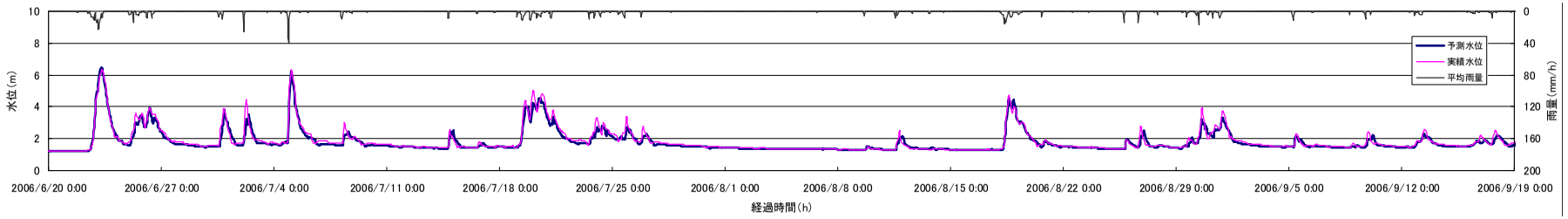


図 4-57　日の出水位（４メッシュ以南 Ave）

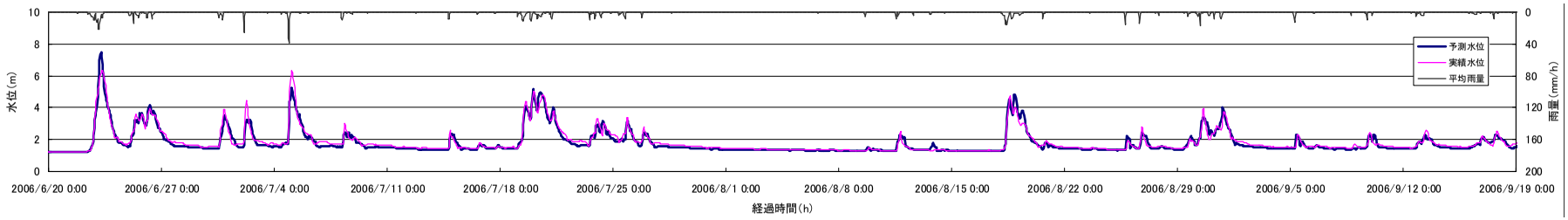


図 4-58　日の出水位（５メッシュ以南 Ave）

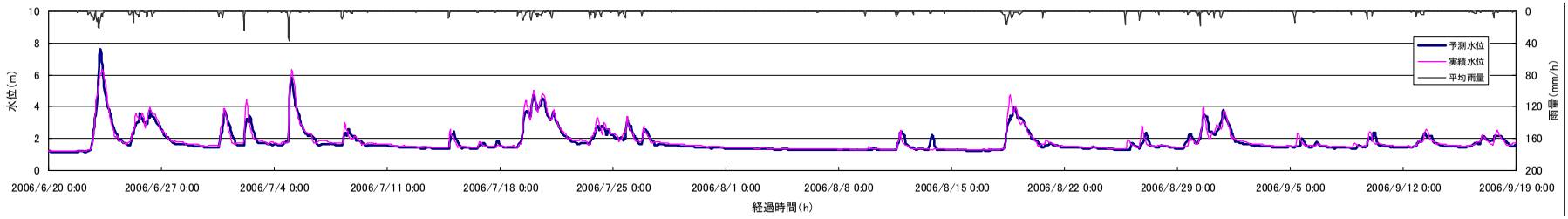


図 4-59　日の出水位（６メッシュ以南 Ave）

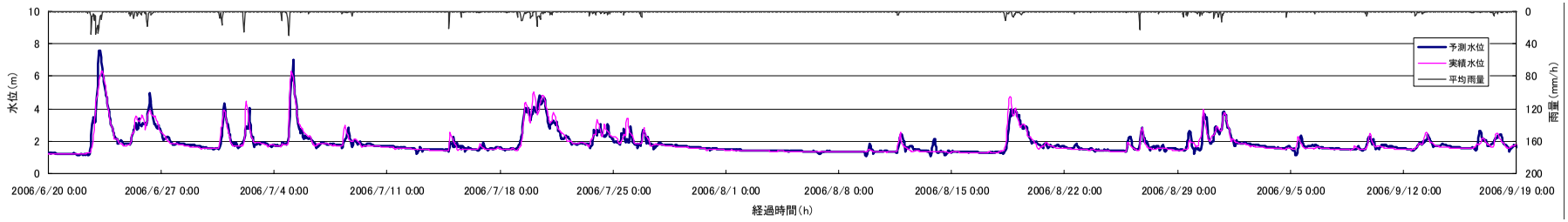


図 4-60　日の出水位（メッシュ雨量）

（５）新橋

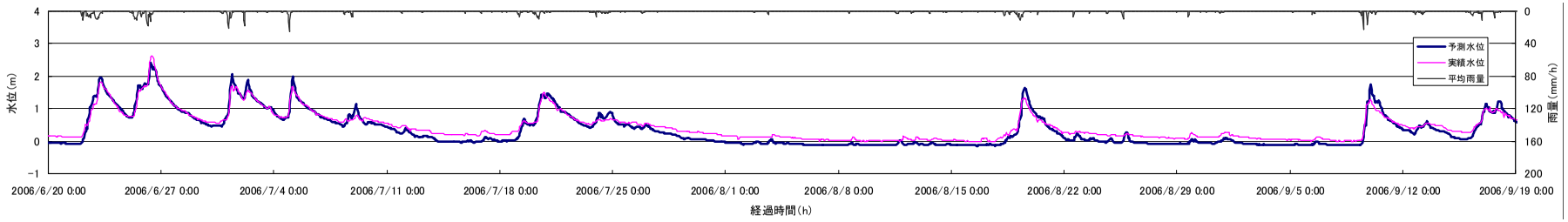


図 4-61　新橋水位（平均雨量）

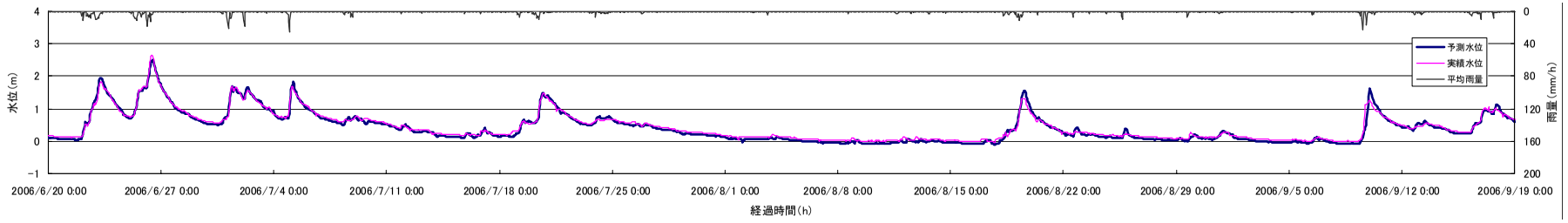


図 4-62　新橋水位（分割平均①）

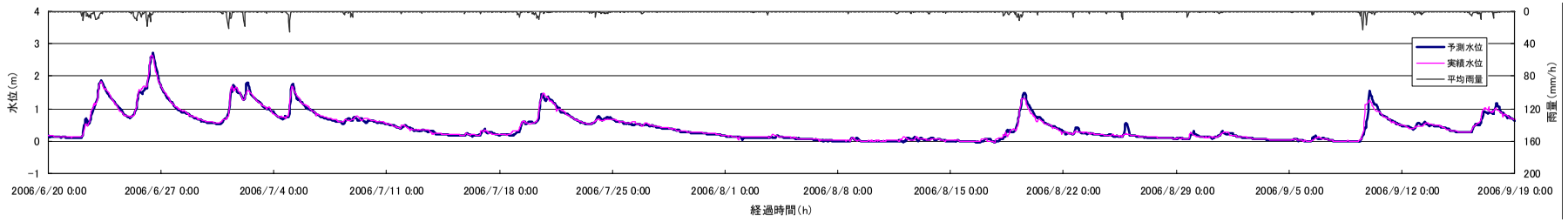


図 4-63　新橋水位（分割平均②）

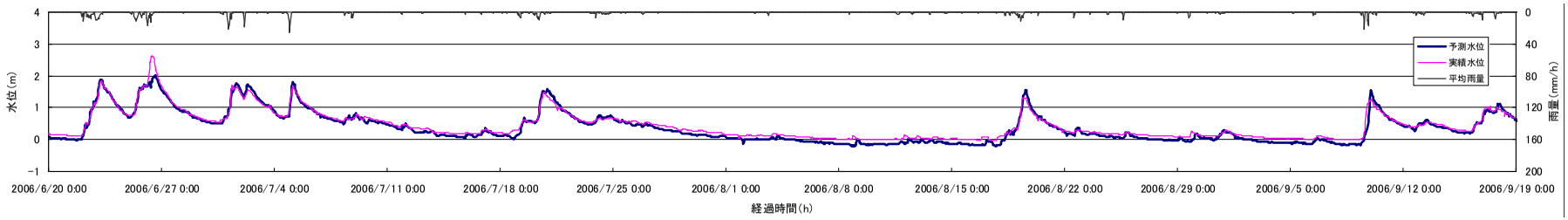


図 4-64　新橋水位（分割平均③）

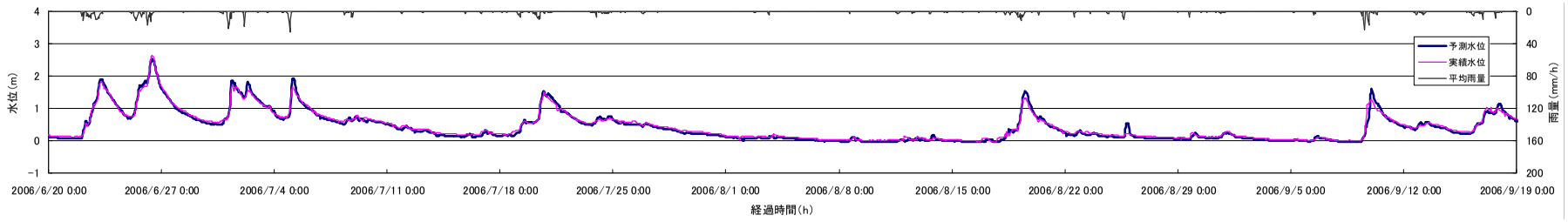


図 4-65　新橋水位（分割平均④）

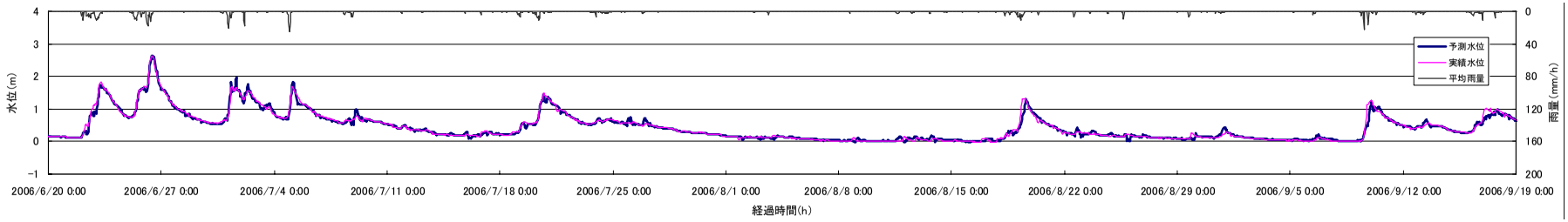


図 4-66　新橋水位（メッシュ雨量）

各分割パターンで予測した未知データの平均誤差とRMSEを図4-67～図4-71に示す。祇園橋を除く勘六橋、川島、日の出橋、新橋の各水位観測所については、平均雨量とメッシュ雨量の間にRMSEが最小となるケースが存在していることが分かる。

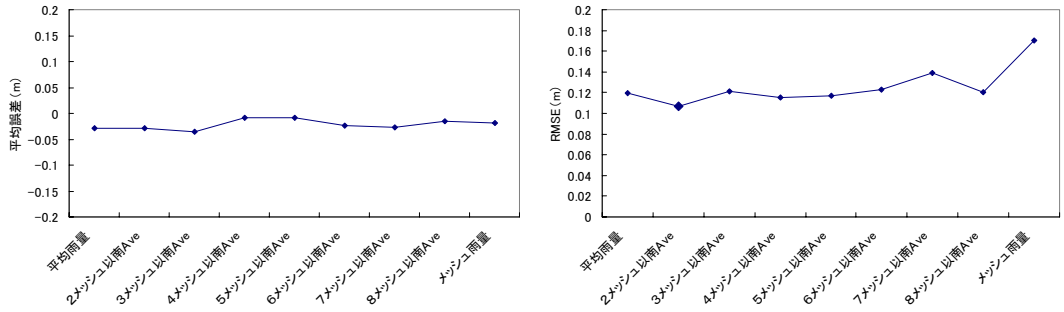


図 4-67　勘六橋水位　未知予測（左：平均誤差、右：RMSE）

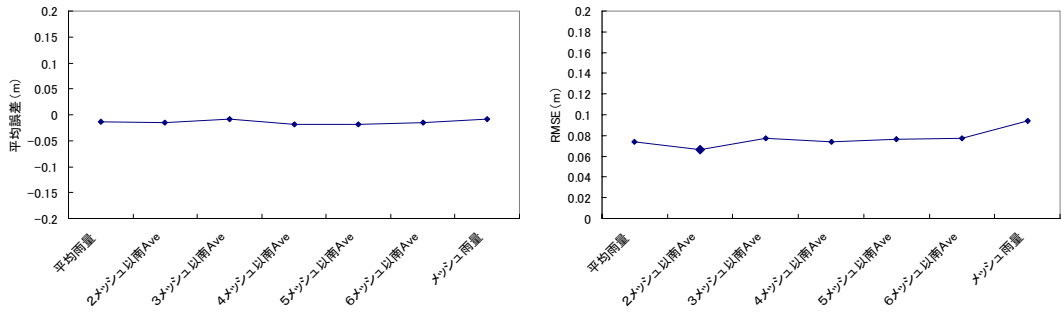


図 4-68　川島水位　未知予測（左：平均誤差、右：RMSE）

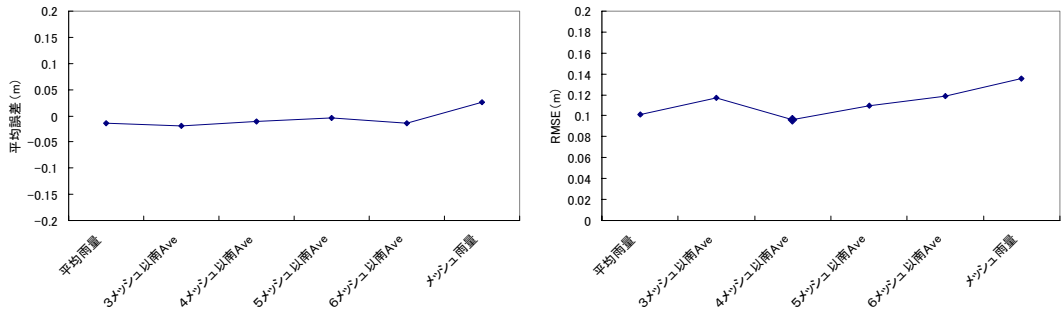


図 4-69　日の出橋水位　未知予測（左：平均誤差、右：RMSE）

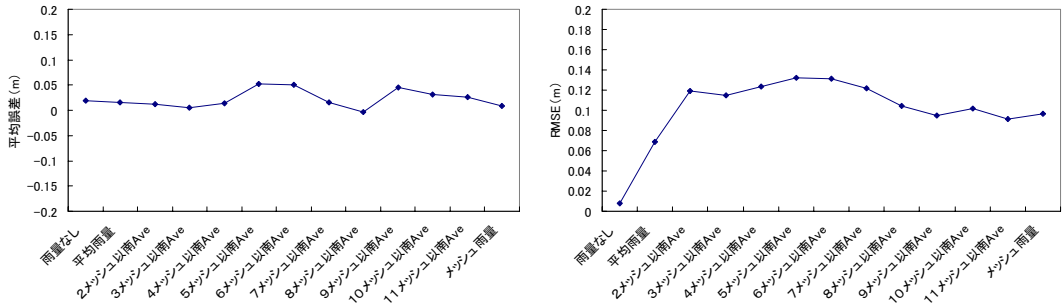


図 4-70　祇園橋水位　未知予測（左：平均誤差、右：RMSE）

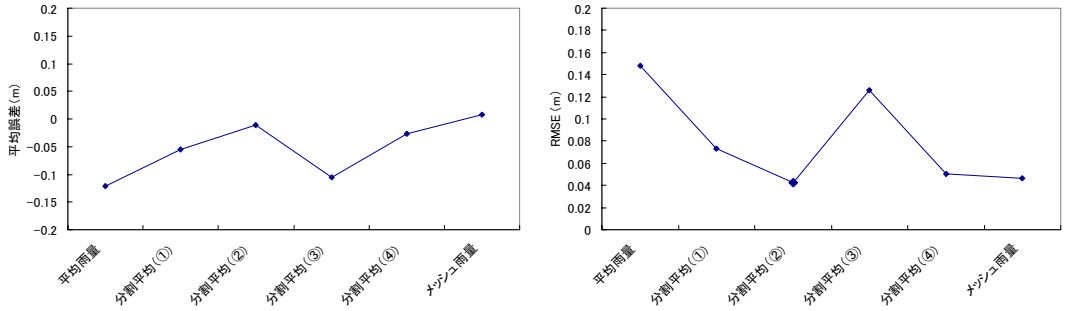


図 4-71　新橋水位　未知予測（左：平均誤差、右：RMSE）

一方、祇園橋については雨量なしモデルの RMSE が最小となり、その次に平均雨量モデルが続いた。更に雨量メッシュを増やしたケースについても雨量無しの RMSE を下回ることは無かった。そこで出水時のデータに着目し、ピーク水位の誤差を表 4-6 にまとめた。その結果、8 メッシュ以南 Ave のモデルが最も精度が高くなることが分かる。

表 4-6　祇園橋のピーク精度評価

	雨量無し	２メッシュ	４メッシュ	６メッシュ	８メッシュ	平均
2006/6/23 8:00	-0.33	-0.17703	-0.21062	0.13062	0.020509	-0.26894
2006/7/5 5:00	-0.45	-0.3085	-0.41593	-0.39585	-0.29767	-0.27576
2006/9/18 7:00	-0.06	-0.42971	-0.20456	-0.17529	-0.09768	-0.09285
平均誤差	-0.28	-0.30508	-0.27703	-0.14684	-0.12495	-0.21252
RMSE	0.324037	0.322057	0.293939	0.261077	0.181263	0.228762

祇園橋を除く水位観測所について、最も精度の高かった雨量分割パターンを表 4-7 にまとめた。最も流域面積の大きい日の出橋は未平均メッシュ数が 21 と多く、最も流域面積の小さい川島は未平均メッシュ数が 6 と少なかった。次に、流域メッシュ数と平均/未平均メッシュ数との関係を図 4-72 に示す。グラフによると、流域メッシュ数と最適な平均/未平均メッシュ数は線形関係にあることが分かる。線形近似式の係数から、全メッシュの約 2 割をメッシュ雨量とし、残りの約 8 割を平均雨量としてモデルを構築したときに最も予測性能が高くなると考えられる。

表 4-7　各水位観測所の最適分割パターン

水位観測所	最良パターン	流域メッシュ数 （流域面積に相当）	未平均 メッシュ数	平均 メッシュ数
勘六橋	２メッシュ以南 Ave	49	4	45
川島	２メッシュ以南 Ave	38	6	32
日の出橋	４メッシュ以南 Ave	91	21	70
新橋	分割平均②	46	13	33

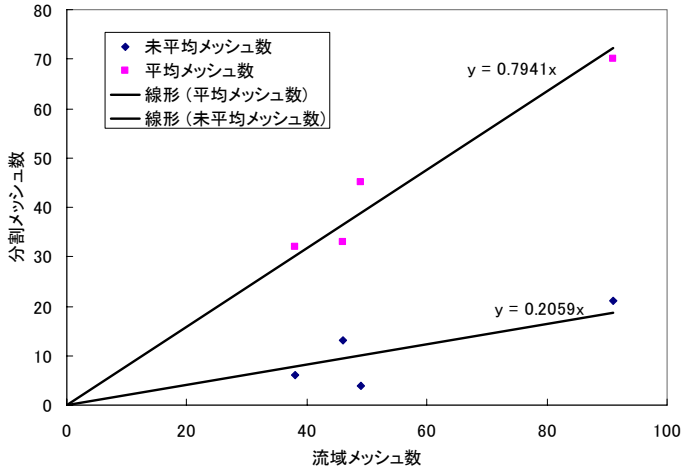


図 4-72　流域メッシュ数と分割メッシュ数の関係

4.3.2. まとめ

各河川流域のケーススタディにおいて、メッシュ雨量を用いた方が高精度になる場合と平均雨量を用いた方が高精度になる場合があることを確認した。メッシュ雨量を用いれば詳細な雨量分布を入力することが出来るものの、メッシュ雨量同士の相関が高いため、多様な雨量データが十分揃わなければ各メッシュ雨量と水位との関係を正確に同定することが困難となる。一方、平均雨量を用いると詳細な雨量分布が失われるため、雨量分布のパターンの違いを予測水位に反映することが出来ないが、多様な雨量データが揃っていない場合においても一定精度のモデルを同定することが出来る。本検証では、遠賀川、佐波川の事例を対象とし、

流域に応じた最適なメッシュ雨量の入力方法を検討した。水位地点から離れた上流域は平均雨量、水位地点に近い領域はメッシュ雨量として入力することとし、領域の比率を数パターン設定して比較分析した。その結果、いずれの水位観測地点においても、全メッシュの２割をメッシュ雨量とし、残りの８割を平均雨量とした場合に最も予測精度が高くなることを確認した。本検証で得られた知見は、様々な河川流域において水位予測モデルを作成する際の指針として活用できるものと期待される。

4.4. 超過洪水時の予測精度評価

草木ダム、佐波川、遠賀川、酒匂川、鶴見川、御笠川の各流域を対象とし、学習データに含まれない超過洪水が発生した場合の予測精度を検証した。

4.4.1. 超過洪水時の予測結果

まず、草木ダムについては 1000m^3/s 未満のデータを学習したモデルを用いて 1000m^3/s 以上の出水を予測する検証を実施した。佐波川、遠賀川、酒匂川、鶴見川、御笠川については、実績データから最大出水部分を除外したデータを学習し、生成されたモデルを用いて除外しておいた最大出水データの 6 時間先予測を行った。比較のため、未知データとすべき最大出水データを含めて学習した場合のトレース計算も実施することとし、御笠川と草木ダムを除く 4 河川については、平均雨量を用いたモデルとメッシュ雨量を用いたモデルの比較も合わせて行った。なお、モデルの入力要素や予測先行時間等の設定条件はこれまでの事例検証に合わせた。解析に用いたデータセットを表 4-8、表 4-9 に示す。

表 4-8　草木ダムの学習/予測に用いたデータセット

	No.	3.1 章における No.	出水日時	ピーク流量 (m^3/s)	総雨量 (mm)
未知	1	学習 1	1998-09-16 7:00 &1998-09-21 23:00	1347.14 309.83	273.6 196.7
	2	学習 2	2001-08-22 11:00	1210.13	348.2
	3	未知 1	2001-09-10 22:00	1119.19	554.5
	4	未知 2	1990-08-10 15:00	1006.67	328.2
学習	5	学習 3	1985-07-01 5:00	973.38	200.92
	6	未知 3	2002-07-11 3:00	921.57	413.7
	7	学習 4	1991-08-20 23:00	829.49	307.2
	8	学習 5	1990-09-20 4:00	767.16	212.4
	9	学習 6	1983-08-17 12:00	707.04	386.24
	10	学習 7	1997-06-20 16:00	649.96	166
	11	未知 4	2003-08-09 16:00	627.79	261
	12	学習 8	1994-09-30 6:00	611.18	296.6
	13	未知 5	2002-10-01 21:00	564.96	149.1
	14	学習 9	1989-08-27 17:00	537.9	238.1
	15	学習 10	1991-08-31 10:00	521.61	176.9
	16	学習 11	1991-09-19 14:00	505.3	295.3
	17	学習 12	1990-11-30 22:00	452.89	162.3
	18	未知 6	1999-08-14 22:00	419.11	296.1
	19	学習 13	1986-09-03 8:00	419.03	235.66
	20	学習 14	1998-08-30 14:00	371.15	434.7
	21	未知 7	1999-07-12 17:00 &1999-07-14 5:00	248.83 350.04	156.8 189.6
	22	学習 15	1985-08-05 2:00	321.86	149.24
	23	学習 16	1993-11-14 2:00	308.74	138.6
	24	未知 8	2004-06-21 20:00	278	85.4
	25	未知 9	1999-06-30 12:00	274.19	218.9
	26	未知 10	2005-08-26 1:00	258.32	204
	27	学習 17	1994-05-27 7:00	256.82	177.6
	28	未知 11	2000-09-12 14:00	254.3	227.6
	29	未知 12	2004-09-30 5:00	254.09	107.1
	30	学習 18	1998-10-18 9:00	252.5	154.1
	31	学習 19	1994-09-17 19:00	251.13	287.4
	32	未知 13	2005-07-26 22:00	240.4	177
	33	未知 14	2004-10-09 20:00	218.31	288.1
	34	未知 15	2004-10-21 0:00	216.62	118.9
	35	学習 20	1983-09-29 0:00	205.27	117.38
	36	未知 16	2001-10-11 1:00	200.15	123.3

表 4-9　各水位予測モデルの学習/予測に用いたデータセット

水系	水位観測所	学習データ	未知データ
佐波川	漆尾	2004/1/1~2005/9/5, 2005/9/14~2004/12/31	2005/9/6~2005/9/13
	新橋	2004/1/1~2005/9/3, 2005/9/16~2004/12/31	2005/9/4~2005/9/15
	堀	2004/1/1~2005/9/5, 2005/9/14~2004/12/31	2005/9/6~2005/9/13
遠賀川	夏吉	2002/1/1~2003/7/17, 2003/7/24~2005/12/31	2003/7/18~2003/7/23
	勘六橋	2002/1/1~2003/7/17, 2003/7/24~2005/12/31	2003/7/18~2003/7/23
	祇園橋	2002/1/1~2003/7/17, 2003/7/24~2005/12/31	2003/7/18~2003/7/23
	宮田橋	2002/1/1~2003/7/10, 2003/7/18~2005/12/31	2003/7/11~2003/7/17
	秋松橋	2002/1/1~2003/7/17, 2003/7/24~2005/12/31	2003/7/18~2003/7/23
	川島	2002/1/1~2003/7/17, 2003/7/23~2005/12/31	2003/7/18~2003/7/22
	大隈	2002/1/1~2005/9/5, 2005/9/10~2005/12/31	2005/9/6~2005/9/9
	添田	2002/1/1~2005/9/3, 2005/9/10~2005/12/31	2005/9/4~2005/9/9
	日の出橋	2002/1/1~2003/7/7, 2003/7/24~2005/12/31	2003/7/8~2003/7/23
	野面	2002/1/1~2004/8/28, 2004/9/6~2005/12/31	2004/8/29~2004/9/5
酒匂川	松田	2004/1/1~2005/8/22, 2005/9/4~2005/12/31	2005/8/23~2005/9/3
	新甘柿橋	2004/1/1~2005/8/22, 2005/9/3~2005/12/31	2005/8/23~2005/9/2
	平山三保ダム	2004/1/1~2005/8/22, 2005/9/4~2005/12/31	2005//8/23~2005/9/3
鶴見川	寺家橋	2002/1/1~2002/9/30, 2002/10/7~2003/12/31	2002/10/1~2002/10/6
	浅山橋	2002/1/1~2002/9/30, 2002/10/7~2003/12/31	2002/10/1~2002/10/6
	末吉橋	2003/1/1~2003/8/13, 2003/8/19~2003/12/31	2003/8/14~2003/8/18
	落合橋	2002/1/1~2002/8/30, 2002/10/7~2003/12/31	2002/10/1~2002/10/6
御笠川	山王橋	2005/4/1~2006/7/2, 2006/7/9~2006/12/31	2006/7/3~2006/7/8

各モデルについて、超過洪水の学習トレースと未知予測を計算した結果を図 4-73～図 4-115 に示す。

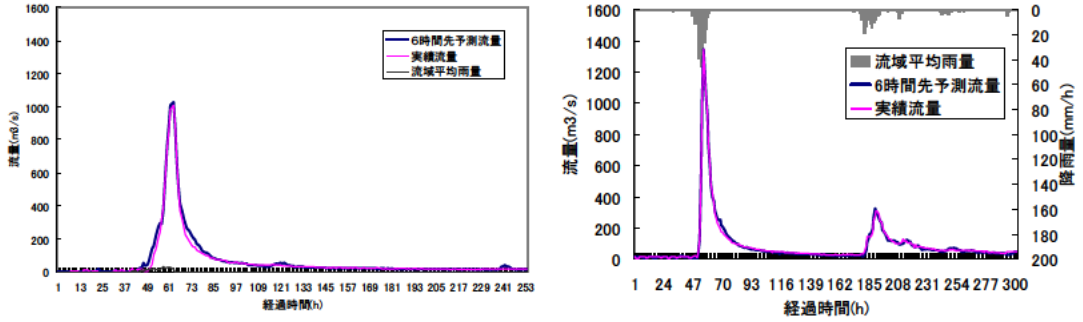


図 4-73　草木ダム 1000m^3/s 越出水の学習トレース結果（平均雨量）

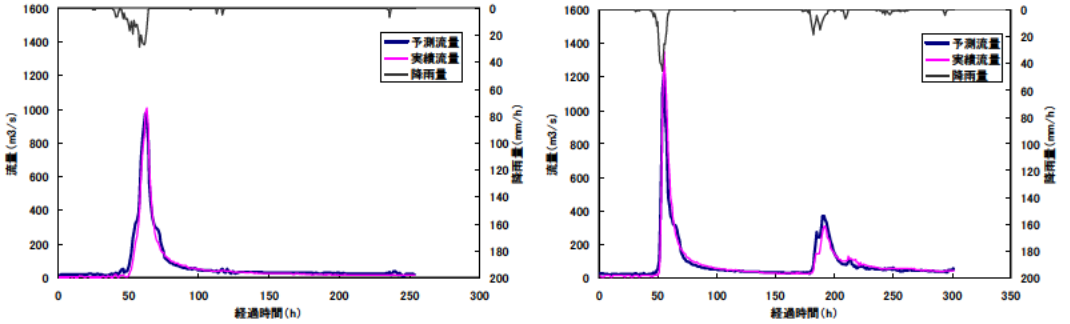


図 4-74　草木ダム 1000m^3/s 越出水の未知予測結果（平均雨量）

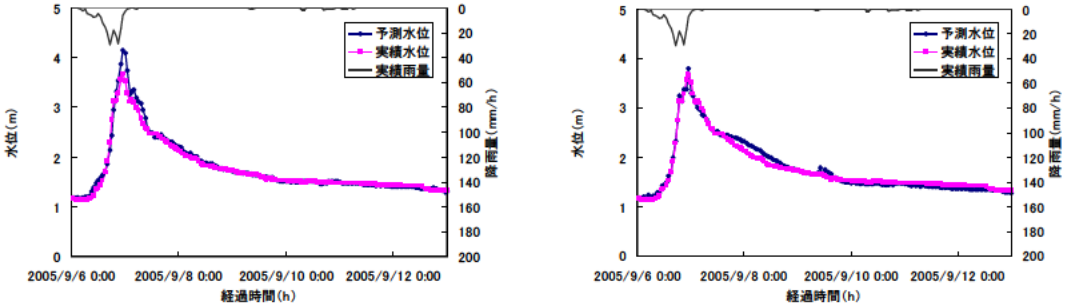


図 4-75　佐波川 漆尾水位 学習トレース（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

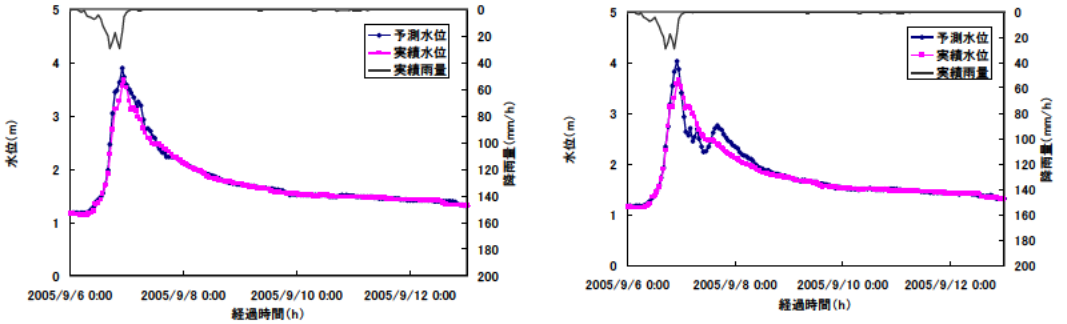


図 4-76　佐波川 漆尾水位 未知予測結果（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

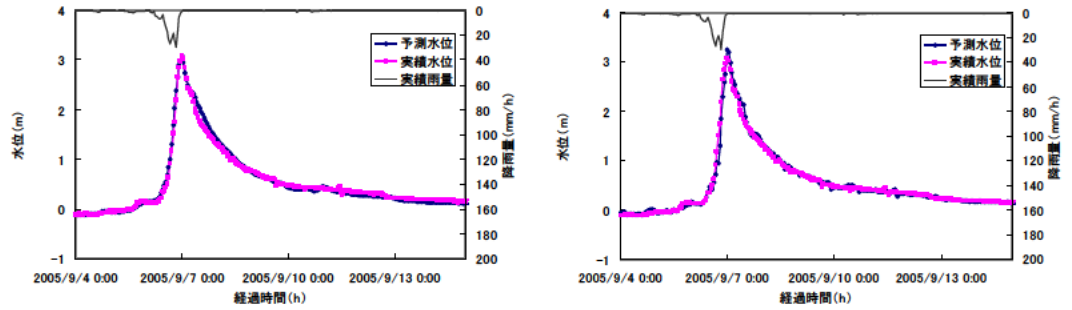


図 4-77　佐波川 新橋水位 学習トレース（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

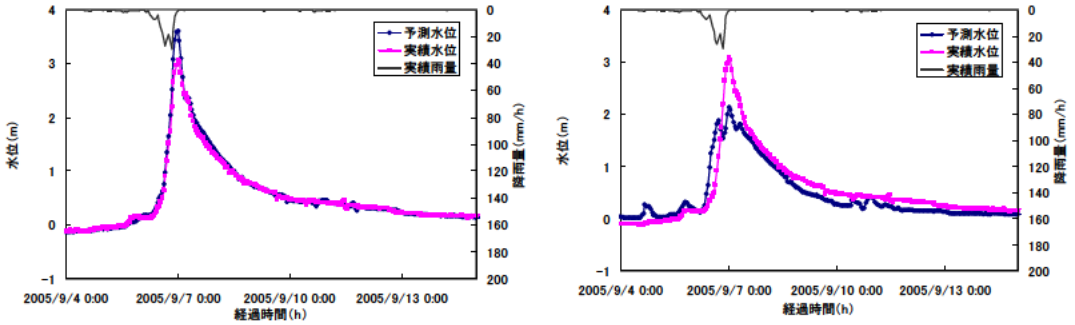


図 4-78　佐波川 新橋水位 未知予測結果（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

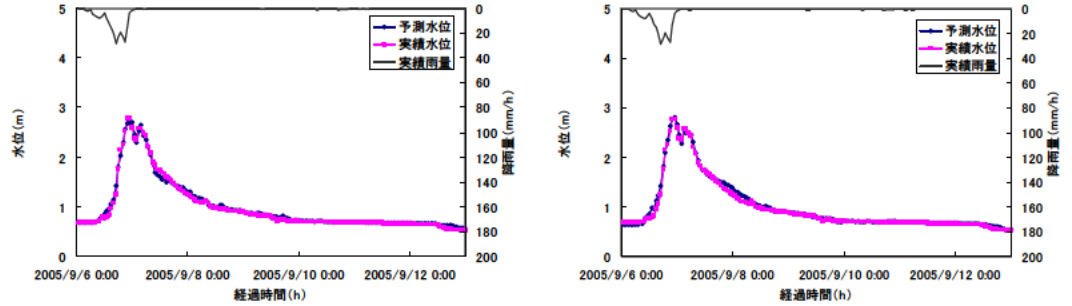


図 4-79　佐波川 堀水位 学習トレース（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

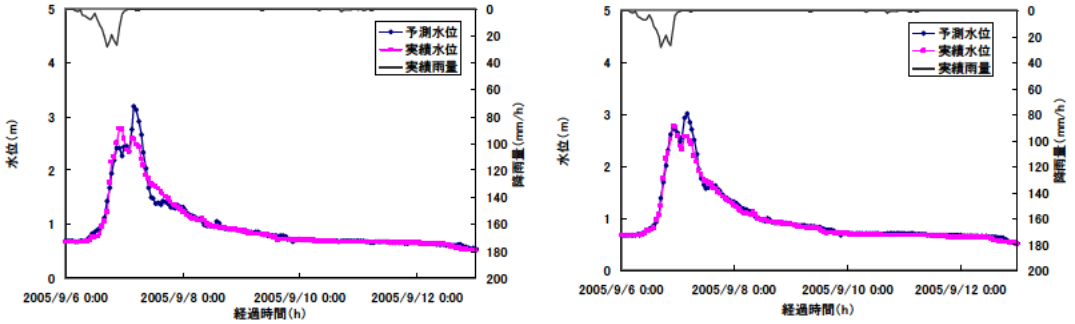


図 4-80　佐波川 堀水位 未知予測結果（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

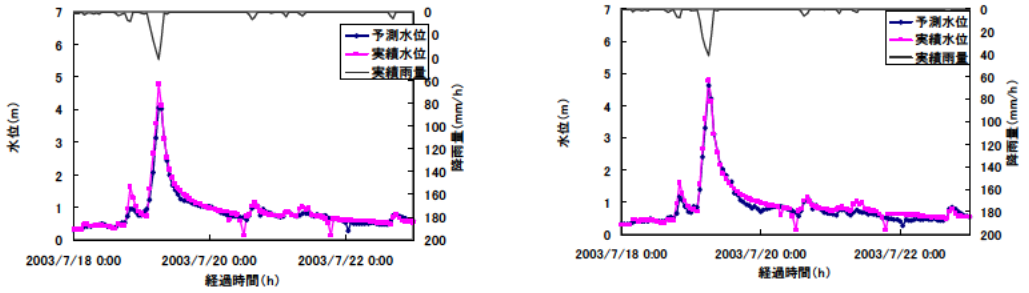


図 4-81　遠賀川 夏吉水位 学習トレース（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

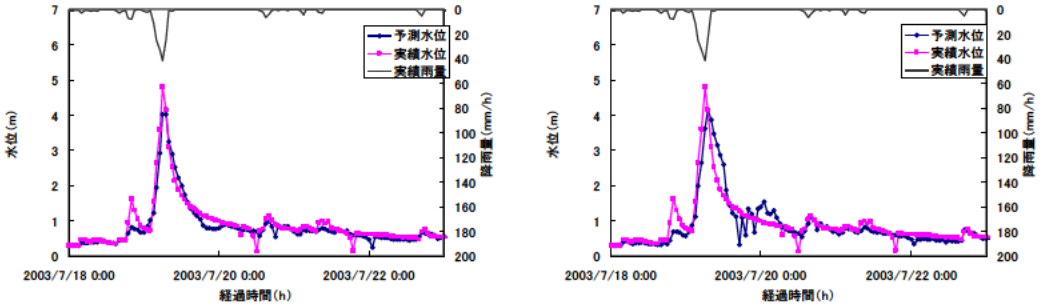


図 4-82　遠賀川 夏吉水位 未知予測結果（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

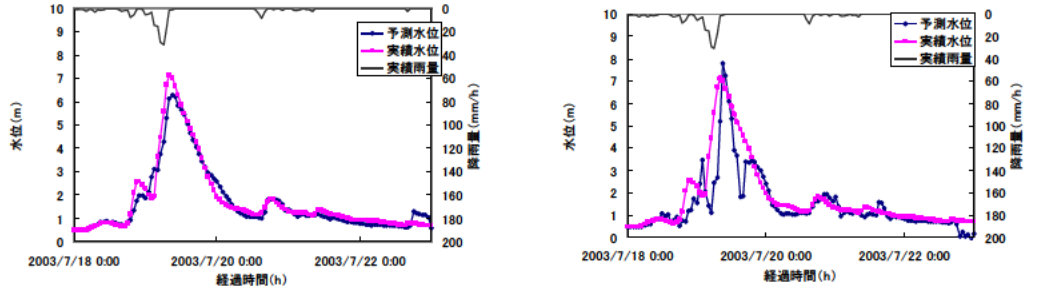


図 4-83　遠賀川 勘六橋水位 学習トレース（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

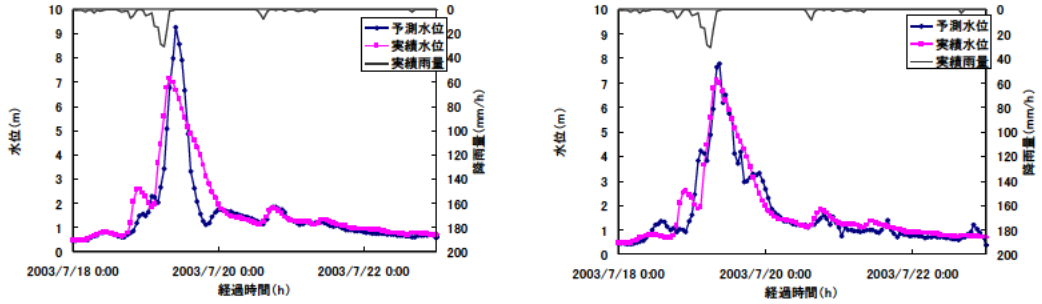


図 4-84　遠賀川 勘六橋水位 未知予測結果（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

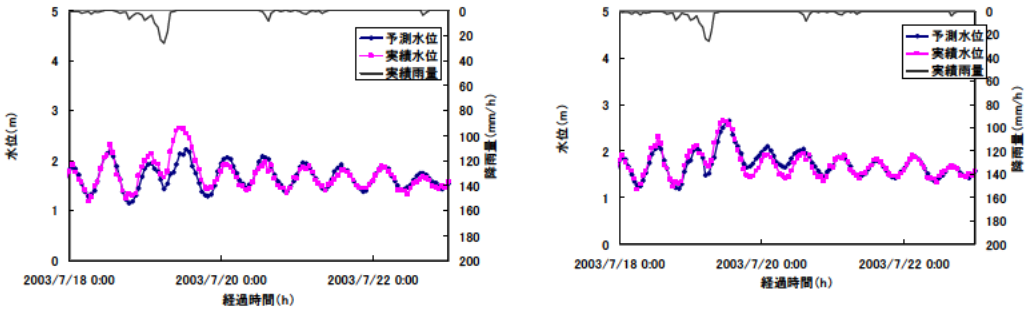


図 4-85　遠賀川 祇園橋水位 学習トレース（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

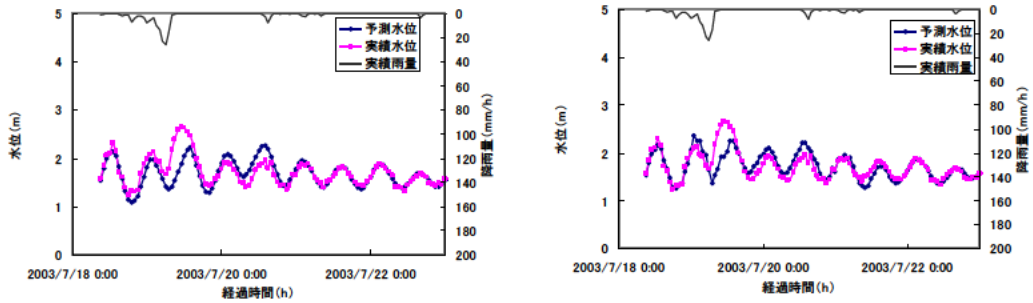


図 4-86　遠賀川 祇園橋水位 未知予測結果（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

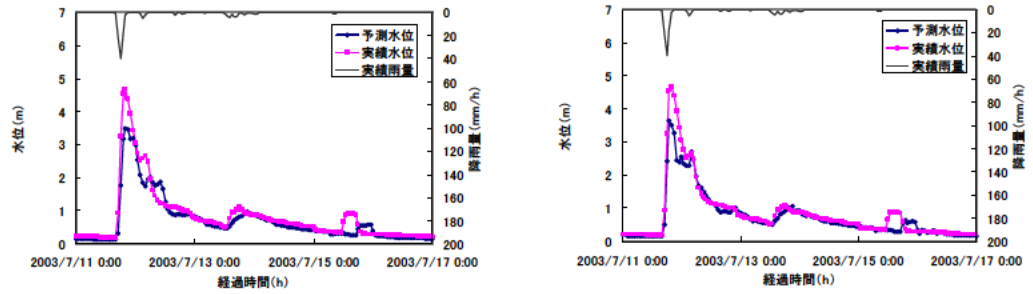


図 4-87　遠賀川 宮田橋水位 学習トレース（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

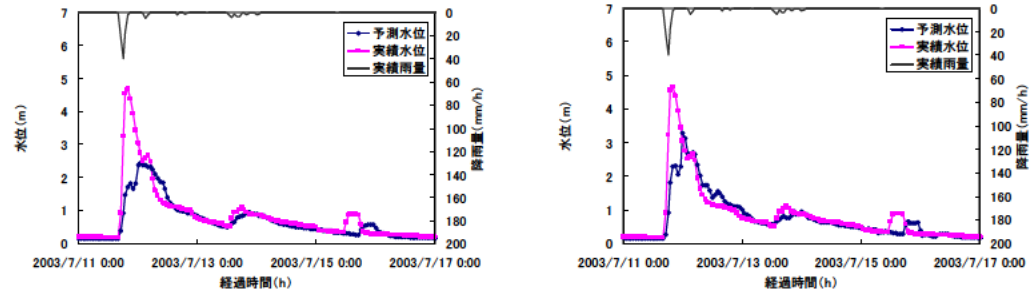


図 4-88　遠賀川 宮田橋水位 未知予測結果（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

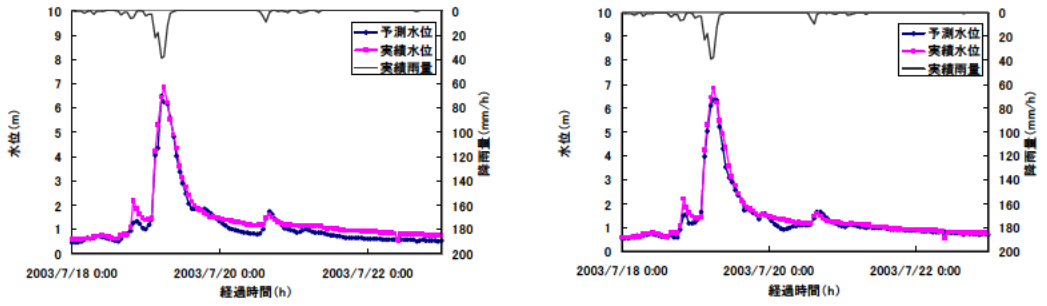


図 4-89　遠賀川 秋松橋水位 学習トレース（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

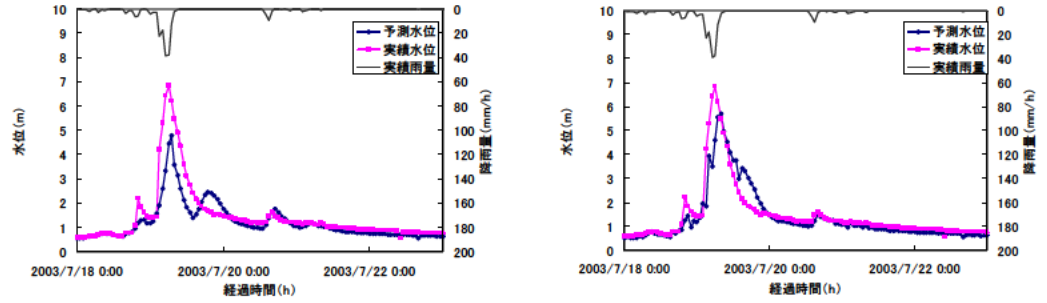


図 4-90　遠賀川 秋松橋水位 未知予測結果（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

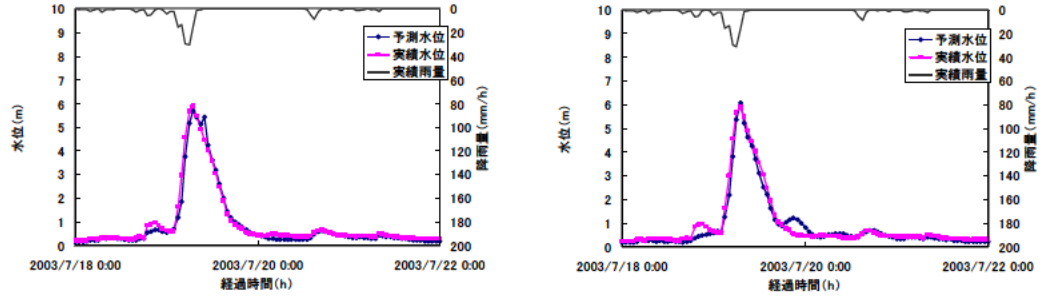


図 4-91　遠賀川 川島水位 学習トレース（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

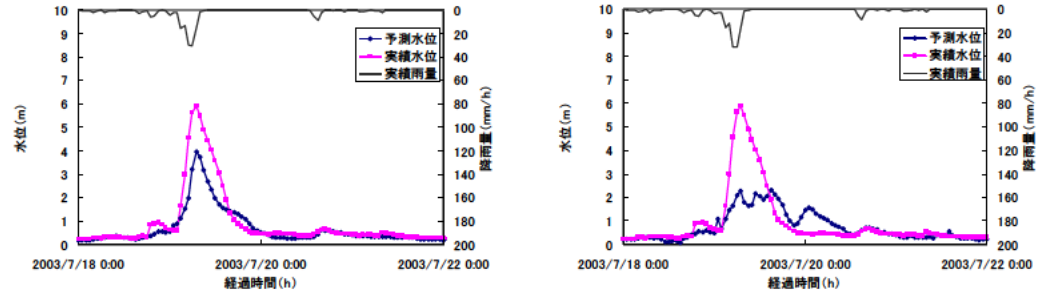


図 4-92　遠賀川 川島水位 未知予測結果（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

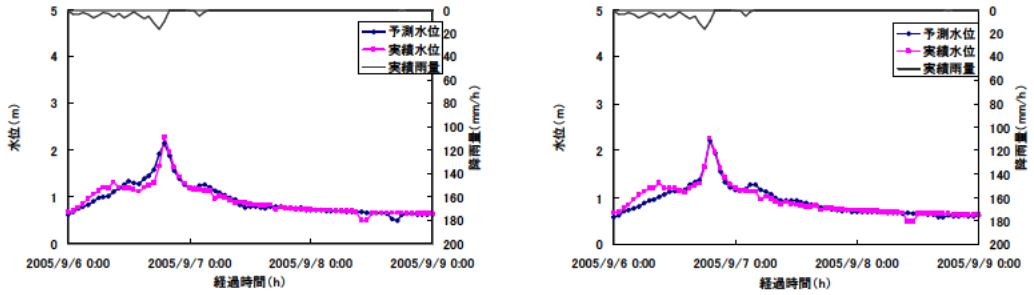


図 4-93　遠賀川 大隈水位 学習トレース（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

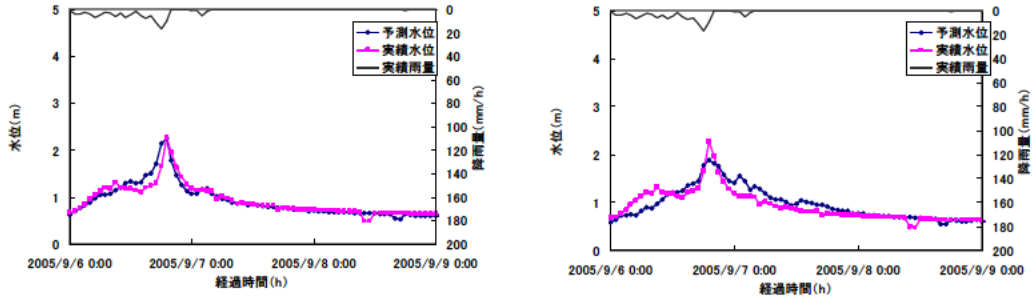


図 4-94　遠賀川 大隈水位 未知予測結果（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

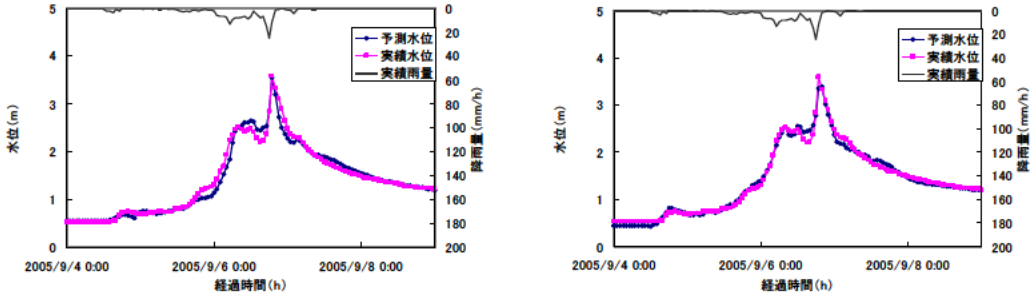


図 4-95　遠賀川 添田水位 学習トレース（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

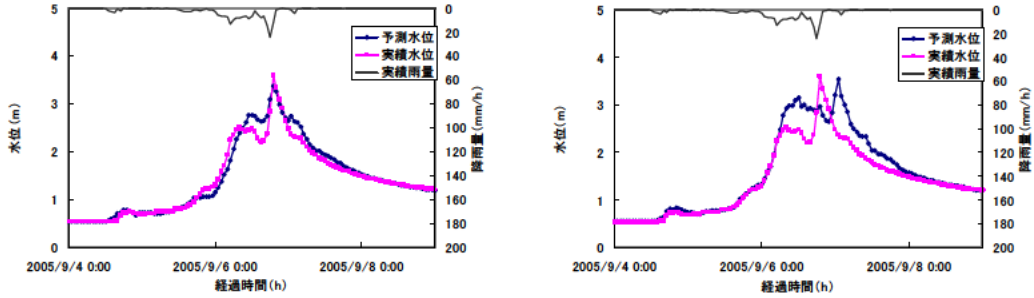


図 4-96　遠賀川 添田水位 未知予測結果（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

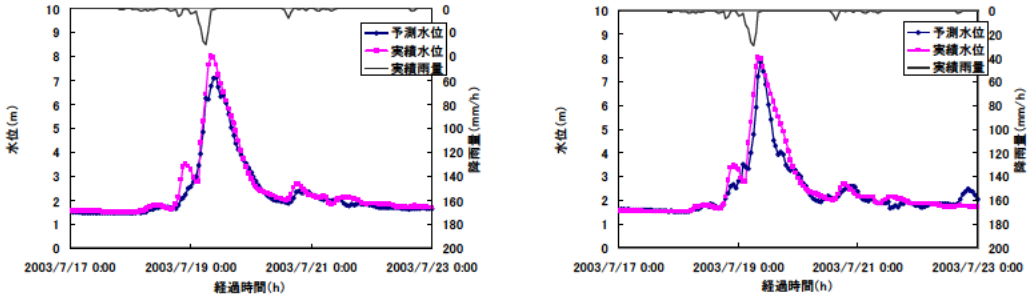


図 4-97　遠賀川 日の出橋水位 学習トレース（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

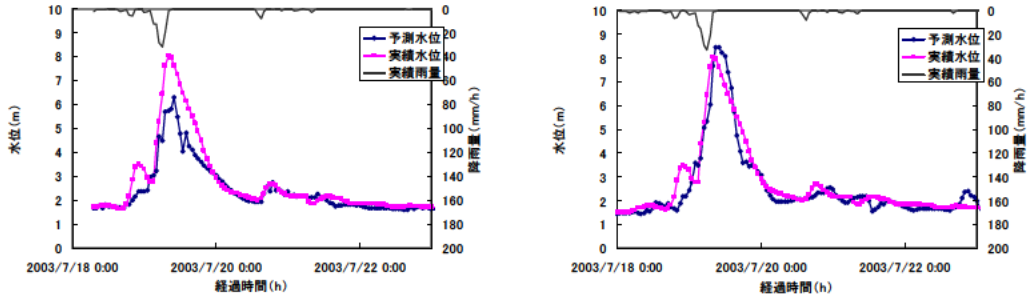


図 4-98　遠賀川 日の出橋水位 未知予測結果（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

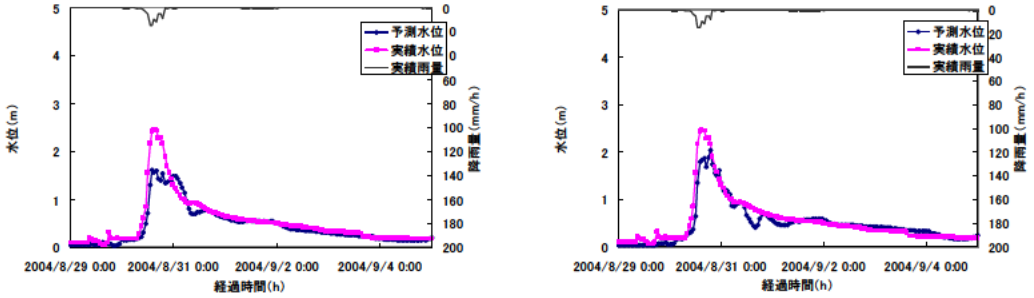


図 4-99　遠賀川 野面水位 学習トレース（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

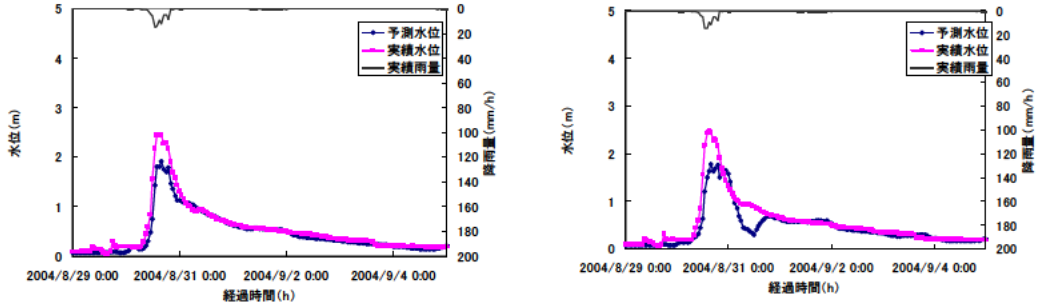


図 4-100　遠賀川 野面水位 未知予測結果（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

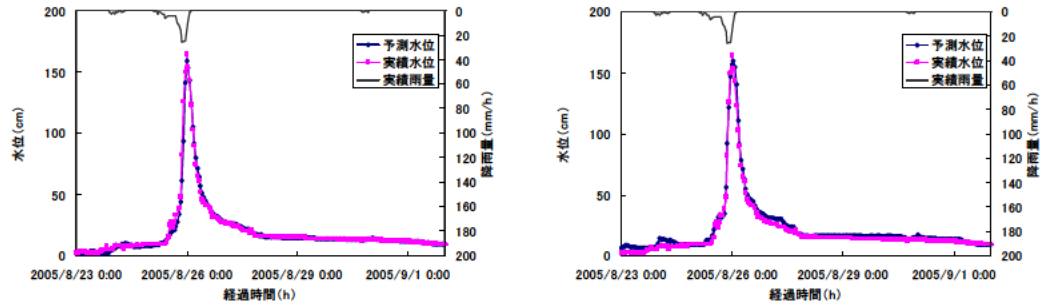


図 4-101　酒匂川 松田水位 学習トレース（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

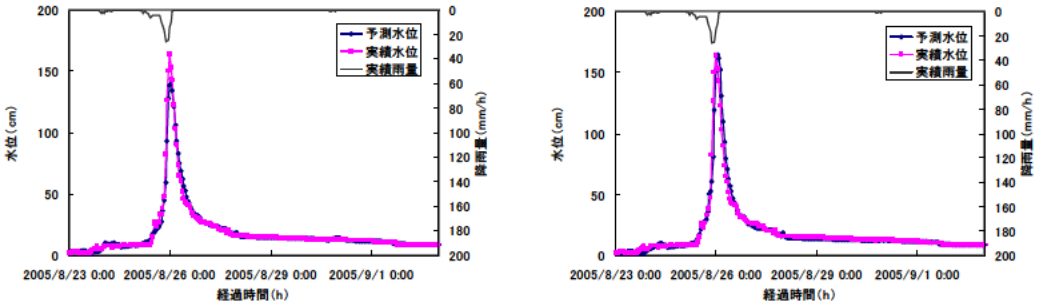


図 4-102　酒匂川 松田水位 未知予測結果（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

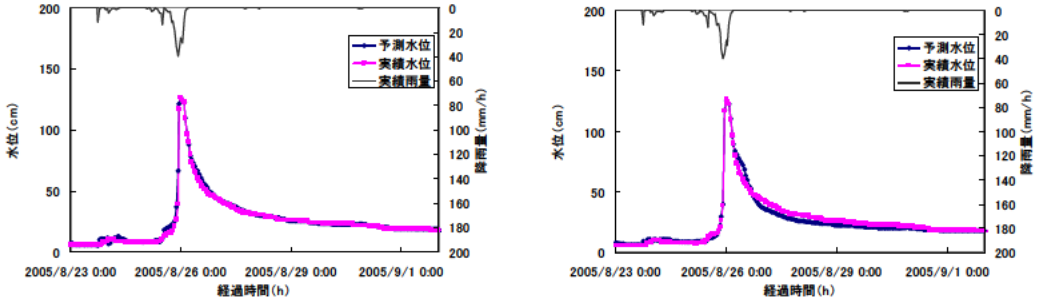


図 4-103　酒匂川 新甘柿橋水位 学習トレース（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

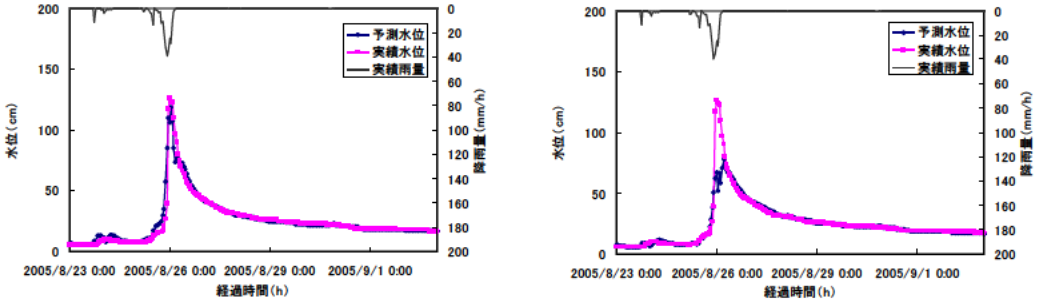


図 4-104　酒匂川 新甘柿橋水位 未知予測結果（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

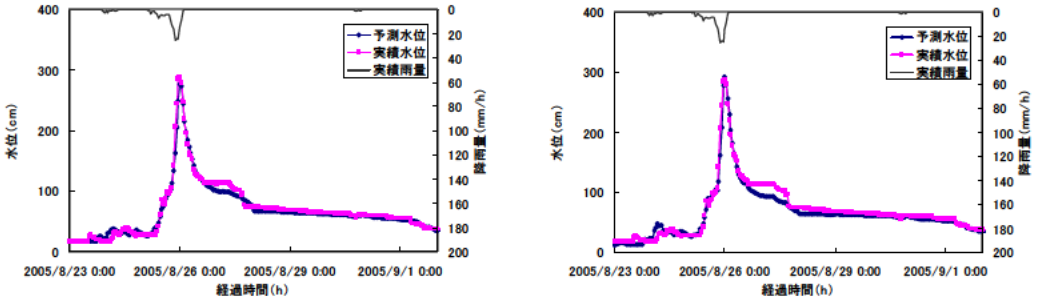


図 4-105　酒匂川 平山三保ダム水位 学習トレース（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

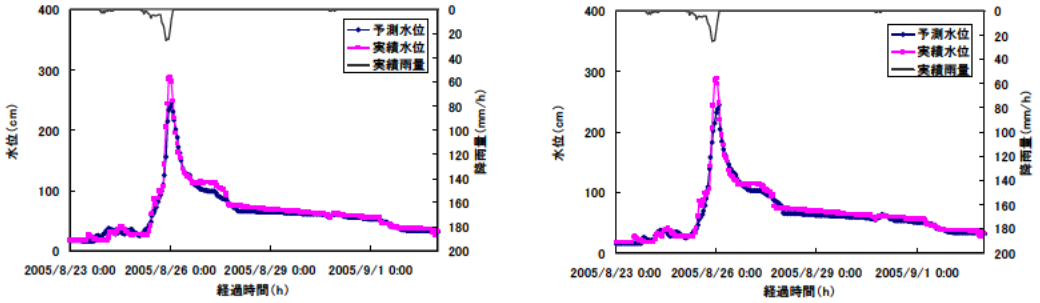


図 4-106　酒匂川 平山三保ダム水位 未知予測結果（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

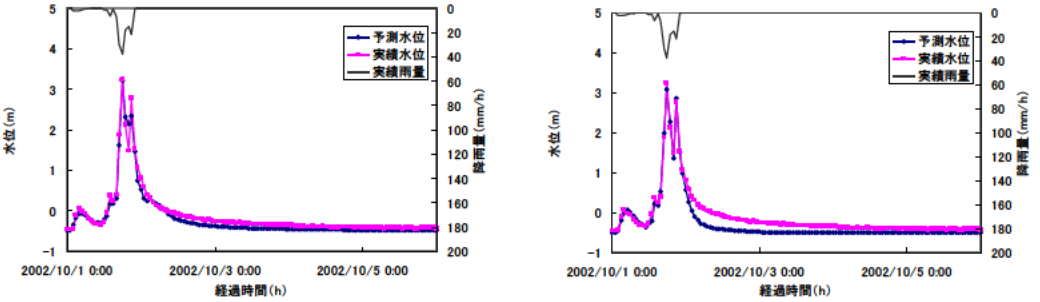


図 4-107　鶴見川 寺家橋水位 学習トレース（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

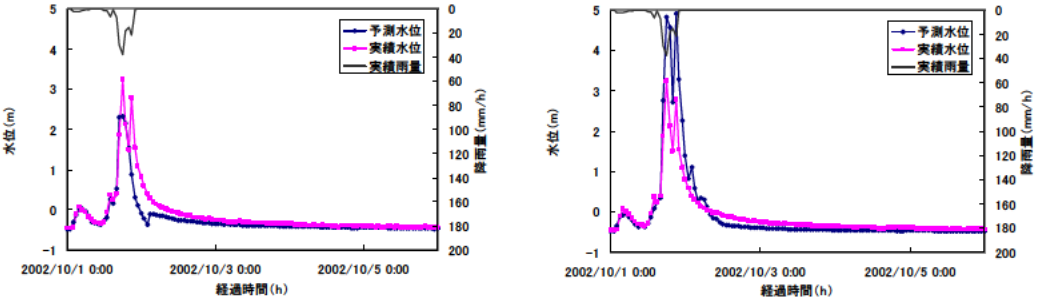


図 4-108　鶴見川 寺家橋水位 未知予測結果（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

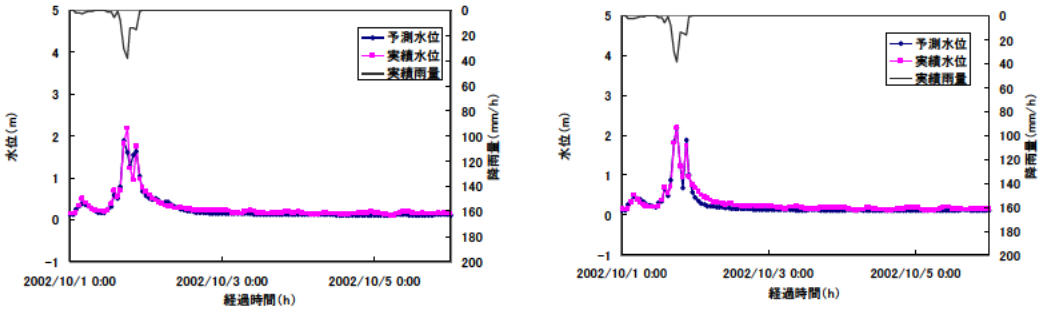


図 4-109　鶴見川 浅山橋水位 学習トレース（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

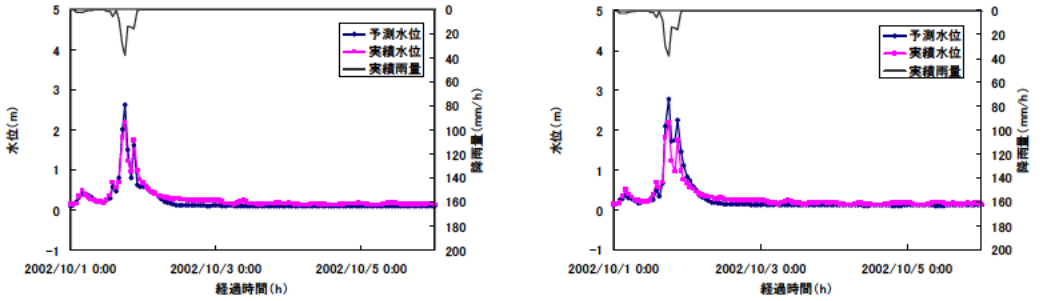


図 4-110　鶴見川 浅山橋水位 未知予測結果（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

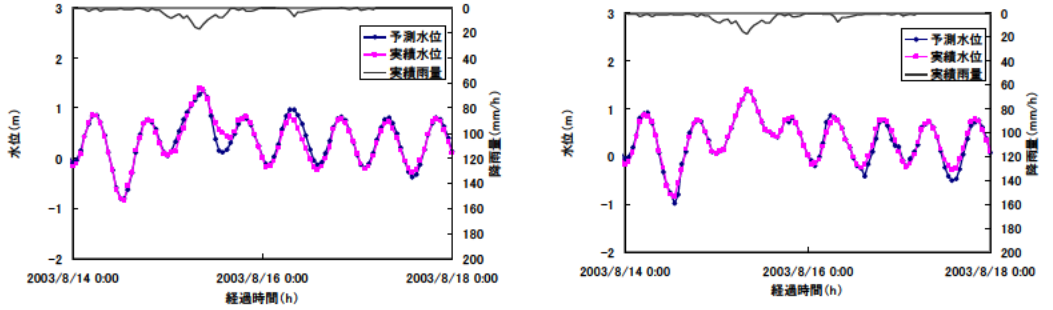


図 4-111　鶴見川 末吉橋水位 学習トレース（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

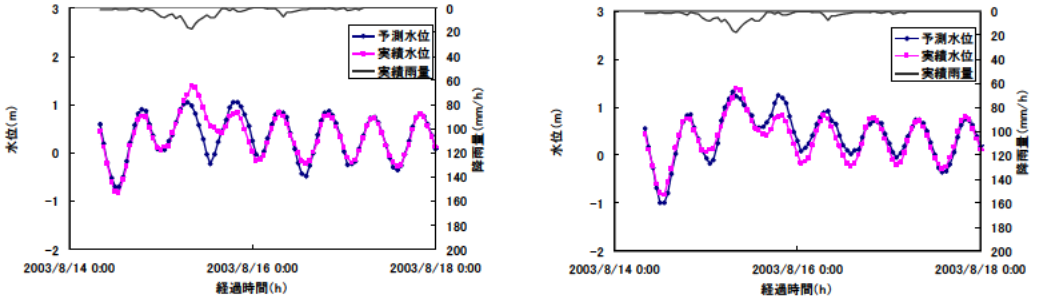


図 4-112　鶴見川 末吉橋水位 未知予測結果（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

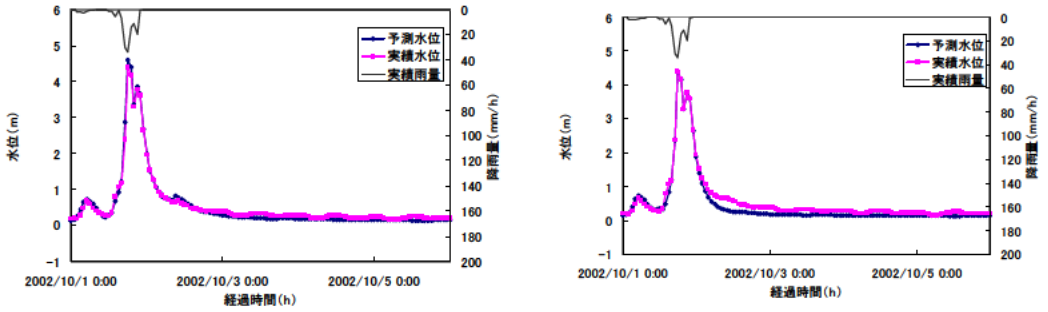


図 4-113　鶴見川 落合橋水位 学習トレース（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

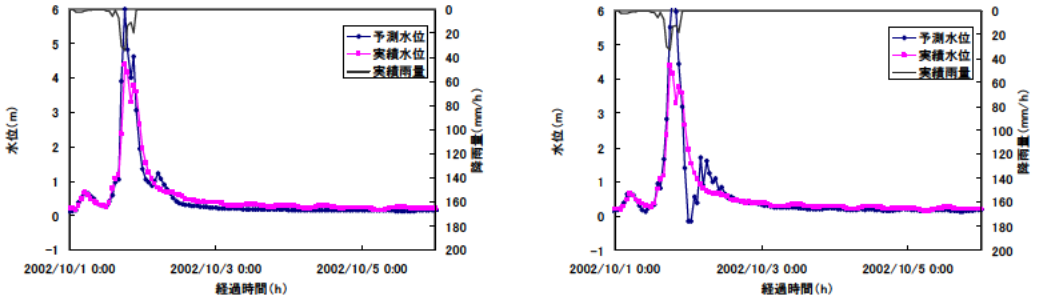


図 4-114　鶴見川 落合橋水位 未知予測結果（左：平均雨量、右：メッシュ雨量）

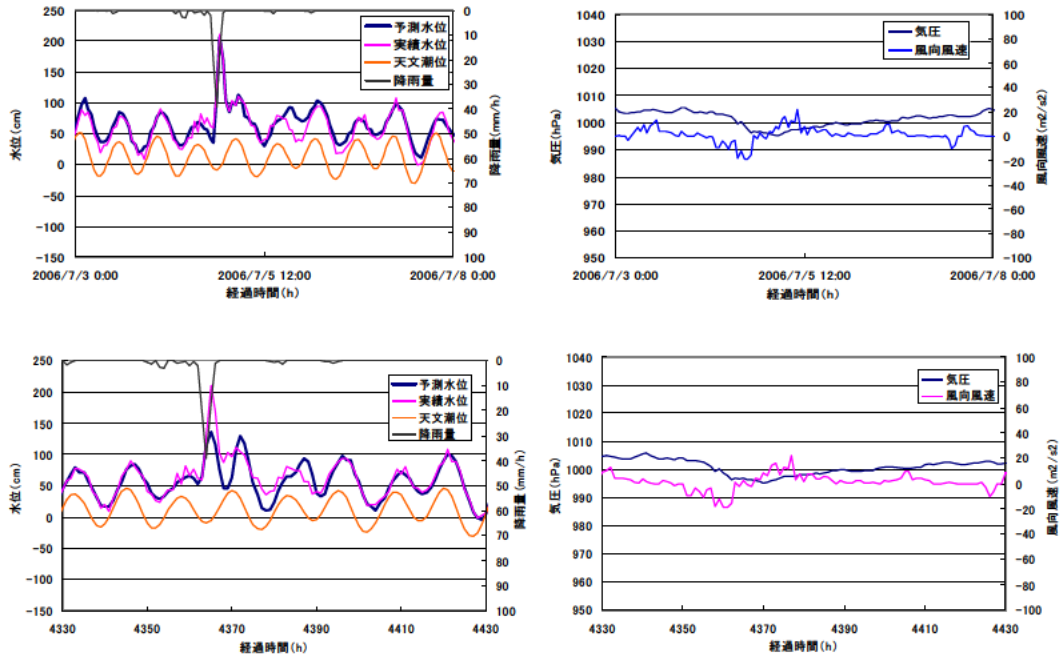


図 4-115　御笠川山王橋水位 未知予測結果（平均雨量）

各モデルについて、学習トレースと未知予測のピーク誤差を比較した結果を図 4-116～図 4-121、表 4-10～表 4-15 に示す。横軸は観測所のメッシュ数が多い順に整列した。一部の観測所を除き、超過洪水の未知予測が低めとなるケースが多いことが分かる。例えば、草木ダムのケースでは 1000m^3/s を超える超過出水が全て低めに予測されており、その内３ケースでピーク誤差が 100m^3/s を超えている。一方、3.1 章で実施した草木ダムの解析では、1000m^3/s を超える事例を含めて学習しているため、同規模の未知データを数 10m^3/s 程度の誤差で予測できている。このことから、大規模の出水を学習事例に含めることにより、同規模の出水であれば、比較的高精度に予測することが可能となると考えられる。

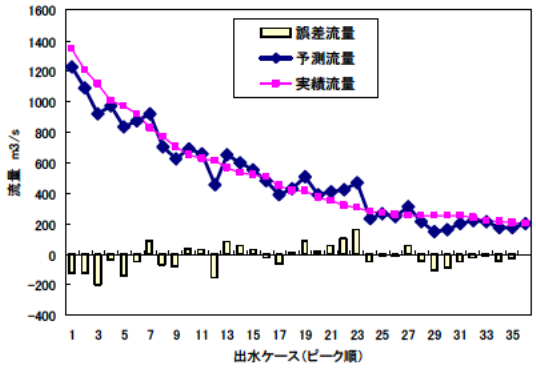


図 4-116　学習トレースと未知予測のピーク誤差（草木ダム）

表 4-10　学習トレースと未知予測のピーク誤差（草木ダム）（単位 m^3/s）

学習/未知	No.	予測流量	実績流量	誤差流量
未知	1	1227.019	1347.14	-120.121
	2	1090.177	1210.13	-119.953
	3	923.0466	1119.19	-196.143
	4	975.0241	1006.67	-31.6459
学習	5	833.4406	973.38	-139.939
	6	873.284	921.57	-48.286
	7	922.5831	829.49	93.09315
	8	702.9406	767.16	-64.2194
	9	629.3904	707.04	-77.6496
	10	690.9842	649.96	41.02422
	11	658.4933	627.79	30.70333
	12	458.6278	611.18	-152.552
	13	651.4582	564.96	86.49819
	14	598.261	537.9	60.36103
	15	552.9158	521.61	31.30585
	16	482.7925	505.3	-22.5075
	17	391.6152	452.89	-61.2748
	18	430.3712	419.11	11.26121

	19	509.8999	419.03	90.86988
	20	391.6079	371.03	20.57789
	21	409.1837	350.04	59.14374
	22	426.3735	321.86	104.5135
	23	470.6674	308.74	161.9274
	24	231.0044	278	-46.9956
	25	266.477	274.19	-7.71301
	26	250.2723	258.32	-8.04775
	27	313.4866	256.82	56.66662
	28	211.7691	254.3	-42.5309
	29	150.5384	254.09	-103.552
	30	163.5372	252.5	-88.9628
	31	202.7664	251.13	-48.3636
	32	220.2107	240.4	-20.1893
	33	213.4591	218.31	-4.85085
	34	174.5688	216.62	-42.0512
	35	177.5437	205.27	-27.7263
	36	201.581	200.15	1.431037

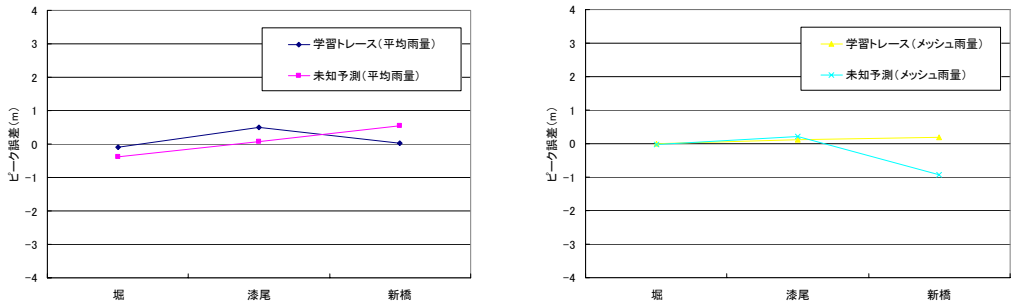


図 4-117　学習トレースと未知予測のピーク誤差（佐波川）

表 4-11　学習トレースと未知予測のピーク誤差（佐波川）（単位 m）

		学習トレース			未知予測		
観測地点	雨量	予測水位	実績水位	誤差	予測水位	実績水位	誤差
堀	平均	2.68	2.78	-0.1	2.41077	2.78	-0.36923
堀	メッシュ	2.780021	2.78	2.05E-05	2.754632	2.78	-0.02537
漆尾	平均	4.16	3.67	0.49	3.738046	3.67	0.068046
漆尾	メッシュ	3.791983	3.67	0.121983	3.874193	3.67	0.204193
新橋	平均	3.086454	3.07	0.016454	3.612167	3.07	0.542167
新橋	メッシュ	3.261402	3.07	0.191402	2.14	3.07	-0.93

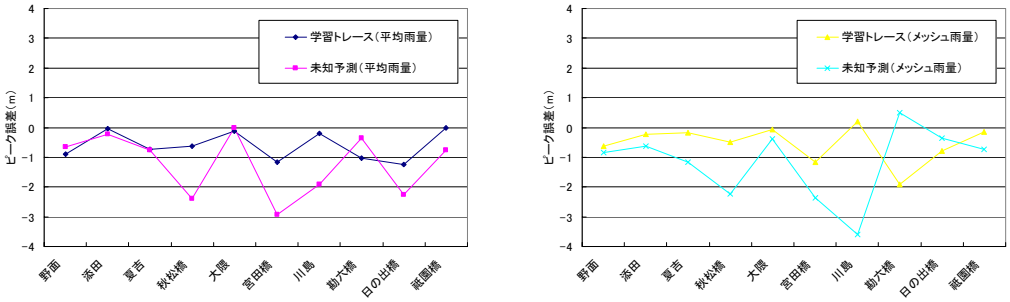


図 4-118　学習トレースと未知予測のピーク誤差（遠賀川）

表 4-12　学習トレースと未知予測のピーク誤差（遠賀川）（単位 m）

		学習トレース			未知予測		
観測地点	雨量	予測水位	実績水位	誤差	予測水位	実績水位	誤差
野面	平均	1.562541	2.46	−0.89746	1.808372	2.46	−0.65163
野面	メッシュ	1.835239	2.46	−0.62476	1.626152	2.46	−0.83385
添田	平均	3.553164	3.59	−0.03684	3.373899	3.59	−0.2161
添田	メッシュ	3.351244	3.59	−0.23876	2.968359	3.59	−0.62164
夏吉	平均	4.061861	4.79	−0.72814	4.036058	4.79	−0.75394
夏吉	メッシュ	4.619031	4.79	−0.17097	3.614656	4.79	−1.17534
秋松橋	平均	6.223827	6.84	−0.61617	4.445509	6.84	−2.39449
秋松橋	メッシュ	6.346576	6.84	−0.49342	4.604555	6.84	−2.23544
大隈	平均	2.143048	2.27	−0.12695	2.262861	2.27	−0.00714
大隈	メッシュ	2.211049	2.27	−0.05895	1.885783	2.27	−0.38422
宮田橋	平均	3.493324	4.67	−1.17668	1.728549	4.67	−2.94145
宮田橋	メッシュ	3.511072	4.67	−1.15893	2.298453	4.67	−2.37155
川島	平均	5.67468	5.88	−0.20532	3.972188	5.88	−1.90781
川島	メッシュ	6.09	5.88	0.21	2.280147	5.88	−3.59985
勘六橋	平均	6.120225	7.14	−1.01977	6.769021	7.14	−0.37098
勘六橋	メッシュ	5.216034	7.14	−1.92397	7.632989	7.14	0.492989
日の出橋	平均	6.766739	8.02	−1.25326	5.751741	8.02	−2.26826
日の出橋	メッシュ	7.223053	8.02	−0.79695	7.649827	8.02	−0.37017
祇園橋	平均	0	0	0	1.89	2.65	−0.76
祇園橋	メッシュ	2.491247	2.65	−0.15875	1.912855	2.65	−0.73714

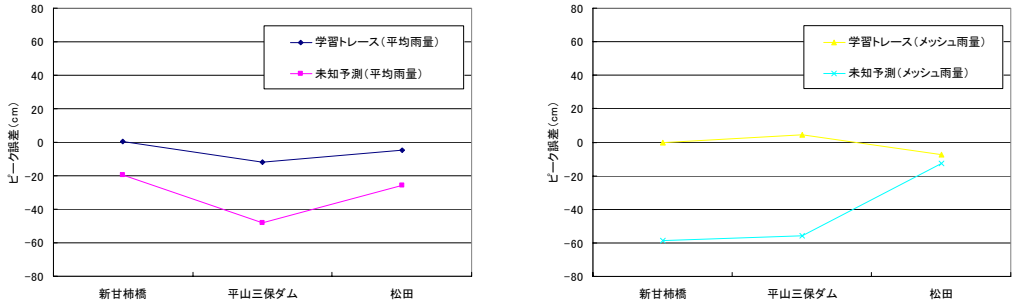


図 4-119　学習トレースと未知予測のピーク誤差（酒匂川）

表 4-13　学習トレースと未知予測のピーク誤差（酒匂川）（単位 cm）

		学習トレース			未知予測		
観測地点	雨量	予測水位	実績水位	誤差	予測水位	実績水位	誤差
新甘柿橋	平均	126.3806	126	0.380596	106.4546	126	−19.5454
新甘柿橋	メッシュ	125.8653	126	−0.1347	67.15708	126	−58.8429
平山三保ダム	平均	276.303	288	−11.697	239.8907	288	−48.1093
平山三保ダム	メッシュ	292.4321	288	4.432148	232.1483	288	−55.8517
松田	平均	159.1686	164	−4.8314	138.3112	164	−25.6888
松田	メッシュ	156.8653	164	−7.13472	151.6233	164	−12.3767

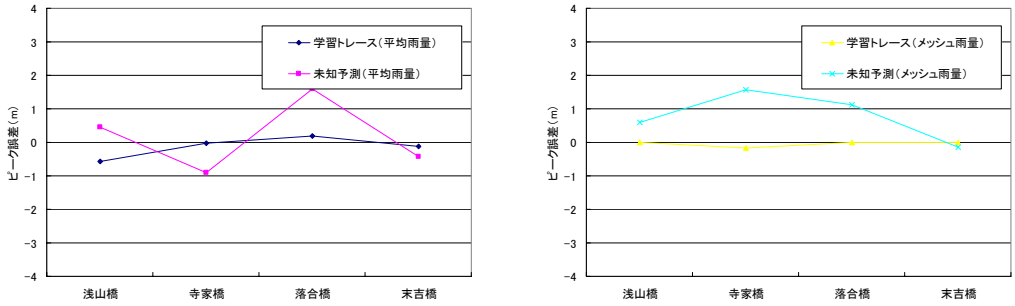


図 4-120　学習トレースと未知予測のピーク誤差（鶴見川）

表 4-14　学習トレースと未知予測のピーク誤差（鶴見川）（単位 m）

		学習トレース			未知予測		
観測地点	雨量	予測水位	実績水位	誤差	予測水位	実績水位	誤差
浅山橋	平均	1.608589	2.19	−0.58141	2.630514	2.19	0.440514
浅山橋	メッシュ	2.183283	2.19	−0.00672	2.782959	2.19	0.592959
寺家橋	平均	3.210098	3.24	−0.0299	2.339285	3.24	−0.90071
寺家橋	メッシュ	3.07	3.24	−0.17	4.815254	3.24	1.575254
落合橋	平均	4.584367	4.4	0.184367	6	4.4	1.6
落合橋	メッシュ	4.40029	4.4	0.00029	5.522438	4.4	1.122438
末吉橋	平均	1.264512	1.39	−0.12549	0.968993	1.39	−0.42101
末吉橋	メッシュ	1.390017	1.39	1.67E−05	1.236774	1.39	−0.15323

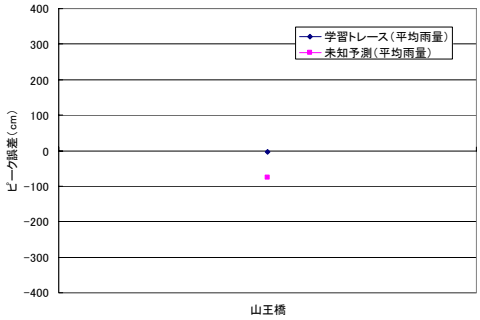


図 4-121　学習トレースと未知予測のピーク誤差（御笠川）

表 4-15　学習トレースと未知予測のピーク誤差（御笠川）（単位 cm）

		学習トレース			未知予測		
観測地点	雨量	予測水位	実績水位	誤差	予測水位	実績水位	誤差
山王橋	平均	207.6973	210.83	−3.13268	136.1319	210.83	−74.6981

図 4-118～図 4-121 の結果を基に、未知データの予測結果が学習トレース結果よりも誤差が増大するケースを表 4-16 にまとめた。平均雨量では過半数のケースで誤差が増大し、メッシュ雨量ではほぼ全てのケースで誤差が増大している。したがって超過洪水が発生した場合に誤差の増大を回避するためには、平均雨量を用いたモデルで予測を行った方が良いと考えられる。

表 4-16　未知予測において誤差が増大するケースの割合

河川	平均雨量	メッシュ雨量
遠賀川	7　(70%)	8　(80%)
酒匂川	3　(100%)	3　(100%)
鶴見川	3　(75%)	4　(100%)
佐波川	2　(67%)	3　(100%)
御笠川	1　(100%)	

次に、学習トレース結果と未知データの予測結果について、平均雨量を用いたモデルとメッシュ雨量を用いたモデルのピーク誤差を比較した。図 4-122～図 4-125 に結果を示す。

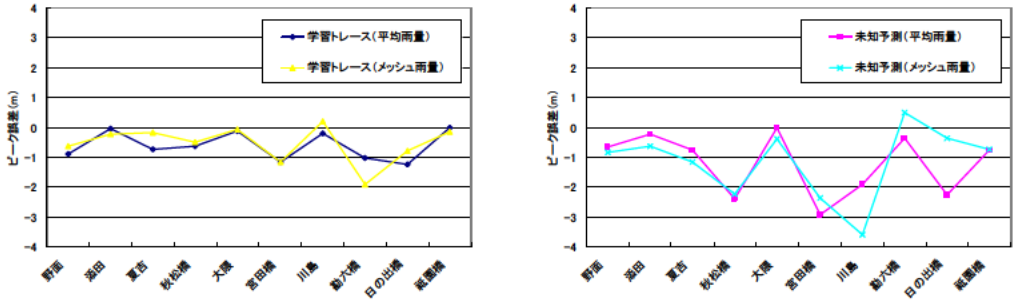


図 4-122　平均雨量とメッシュ雨量のピーク誤差（遠賀川）

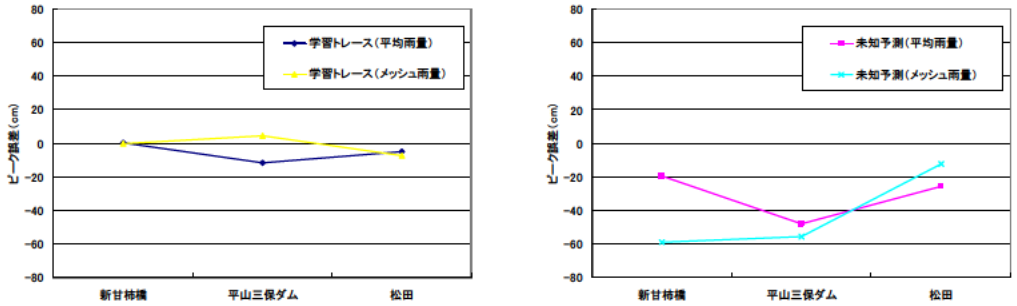


図 4-123　平均雨量とメッシュ雨量のピーク誤差（酒匂川）

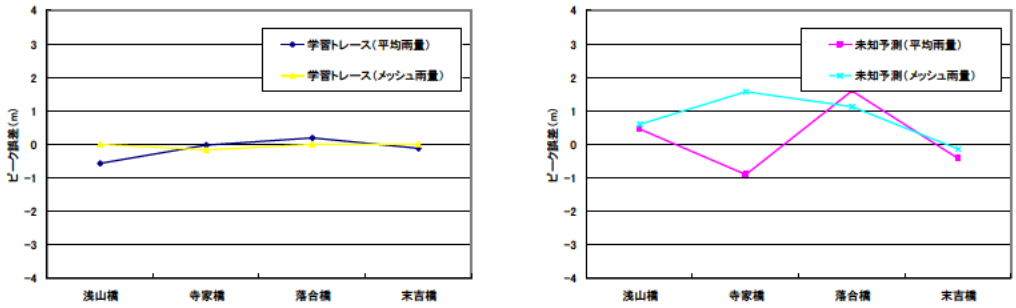


図 4-124　平均雨量とメッシュ雨量のピーク誤差（鶴見川）

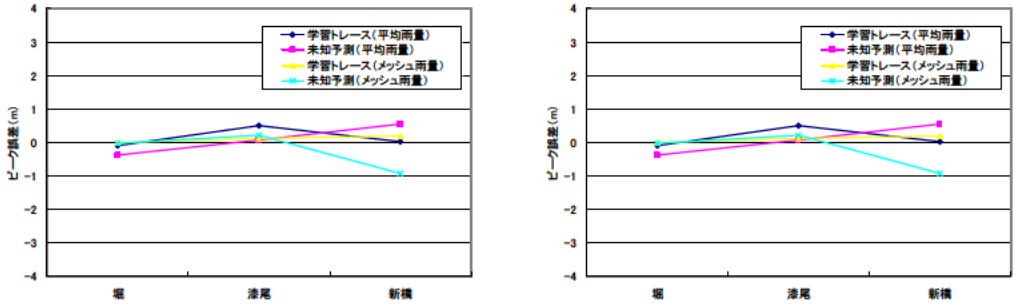


図 4-125　平均雨量とメッシュ雨量のピーク誤差（佐波川）

未知データの予測結果が学習トレース結果よりも誤差が増大するケースを表 4-17 にまとめた。学習トレース結果ではメッシュ雨量モデルのほうが誤差が小さくなるケースが多いが、未知データの予測では逆に平均雨量モデルの方が誤差が小さくなるケースが多い。つまり、十分なデータを学習すればメッシュ雨量を用いた方が高精度な予測を行えるが、今回の検証のように数年間のデータしか与えられていない場合には平均雨量を用いた方が超過洪水に対する予測安定性は増すと考えられる。

表 4-17　平均雨量モデルの方が誤差が小さくなるケースの割合

	学習トレース	未知予測
遠賀川	4　(40%)	6　(60%)
酒匂川	1　(33%)	2　(67%)
鶴見川	1　(25%)	2　(50%)
佐波川	1　(33%)	2　(67%)

4.4.2. まとめ

各河川流域のケーススタディでは、モデルを実際に運用することを想定し、１年分の未知データを用いて予測精度を検証した。その結果、学習範囲を大きく逸脱しない出水に対しては良好な精度で予測できることを確認した。しかしながら、学習範囲を大きく逸脱する出水が発生した場合の予測精度についても検証しておく必要がある。そこで本検証では、鶴見川、遠賀川、佐波川、酒匂川、御笠川、草木ダムの各河川流域を対象とし、最大ピークの出水期間を除外したデータを学習し、生成されたモデルを用いて最大出水を予測することにより未曾有の出水に対する予測精度を評価した。その結果、一部の水位観測地点を除き、予測水位が低めとなるケースが多いことが分かった。しかし、最大出水相当のデータを学習することができれば、それと同じ規模の洪水については十分な精度のモデルを構築できることが分かった。また、十分なデータが揃っている場合はメッシュ雨量を用いた方が高精度な予測を行えるが、今回の検証のように数年間のデータしか与えられていない場合においては、平均雨量を用いることにより大幅な精度悪化を回避でき、超過洪水に対する予測安定性を増すことができることが分かった。

4.5. 予報雨量誤差が予測水位に及ぼす影響評価

前章までの水位予測解析ではモデル自体の精度を評価することを目的としていたため、予測先行時間分の雨量は実績値を用いていた。一方、実際の水位予測システムでは予報雨量を入力として用いることになるため、予測水位の精度が雨量予報の誤差に影響される。本解析では予報雨量の誤差が予測水位に及ぼす影響について検証した。

4.5.1. 予報雨量誤差による評価方法

ある時刻に発表された予報雨量を用いて６時間先までの予測水位を計算することを想定し、６時間予報雨量通りの雨量が降ったケース、雨が全く降らなかったケース、予報雨量の倍の雨が降ったケースを段階的に設定した。表 4-18 に雨量誤差の付加ケースを示す。

表 4-18　予報雨量誤差の付加ケース

No.	雨量予報誤差の割合	想定内容
1	-1	実績雨量が 0
2	-0.8	予報雨量より 80%少ない雨量
3	-0.6	予報雨量より 60%少ない雨量
4	-0.4	予報雨量より 40%少ない雨量
5	-0.2	予報雨量より 20%少ない雨量
6	-0.1	予報雨量より 10%少ない雨量
7	0	予報雨量と実績雨量が一致
8	0.1	予報雨量より 10%多い雨量
9	0.2	予報雨量より 20%多い雨量
10	0.4	予報雨量より 40%多い雨量
11	0.6	予報雨量より 60%多い雨量
12	0.8	予報雨量より 80%多い雨量
13	1	予報雨量の倍の雨量

実績雨量を用いた場合の予測水位（基準水位と呼ぶ）と、雨量誤差を与えた場合の予測水位の差を式 4-5 により算出し、これを水位予測変化量と呼ぶことにする。次に、水位予測変化量の統計量として、平均値 μ と標準偏差を式 4-6、式 4-7 により算出した。

$$\Delta H_t = H_t\left((1+\alpha)\times R\right) - H_t\left(R\right) \qquad \text{式 4-5}$$

$$\mu = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\Delta H_t \qquad \text{式 4-6}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\left(\Delta H_t - \mu\right)^2} \qquad \text{式 4-7}$$

ここで、H：予測水位、R：実績雨量、α：雨量予報誤差の割合、t：時間、μ：平均値、σ：標準偏差、T：全予測時間である。

4.5.2. 予報雨量誤差付加時の予測結果

佐波川新橋、遠賀川野面、勘六橋、日の出橋の各水位を対象とし、メッシュ雨量モデルおよび平均雨量（または分割平均）モデルを用いて予報雨量誤差付加時の予測計算を実施した。図 4-126～図 4-157 に各水位観測所の予測水位変化量の計算結果を示す。雨量予報誤差と水位予測変化量の平均値はほぼ線形関係にあることが分かる。また、雨量予報誤差と水位予測変化量の標準偏差は２次の関係にあることから、雨量予報の誤差が増加すると予測水位のばらつきが増大することが分かる。

予報雨量の誤差に対する水位変化量の特性を把握することにより、ある予報雨量誤差における水位予測変化量の平均値がμ、標準偏差がσであった場合、正規分布を仮定すると 99.7%の確率で予測水位が　　式 4-8 の範囲に収まると考えることができる。

$$H(t,R) - 3\sigma \le H \le H(t,R) + 3\sigma \qquad \text{式 4-8}$$

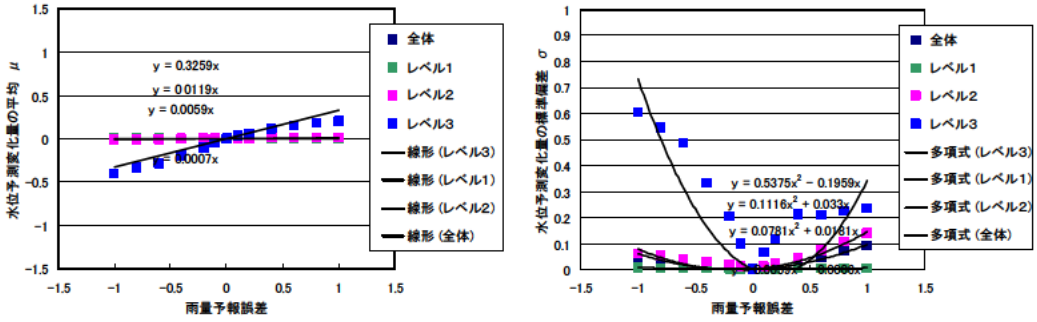


図 4-126　遠賀川 秋松橋 メッシュ雨量の水位予測変化量（１時間先予測）

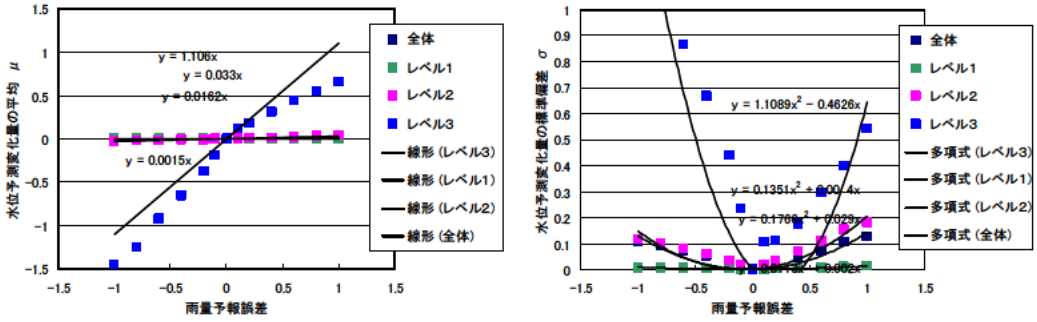


図 4-127　遠賀川 秋松橋 メッシュ雨量の水位予測変化量（２時間先予測）

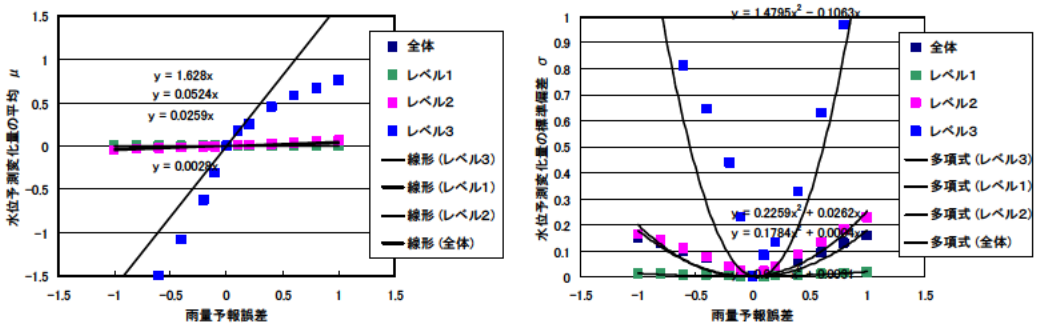


図 4-128　遠賀川 秋松橋 メッシュ雨量の水位予測変化量（３時間先予測）

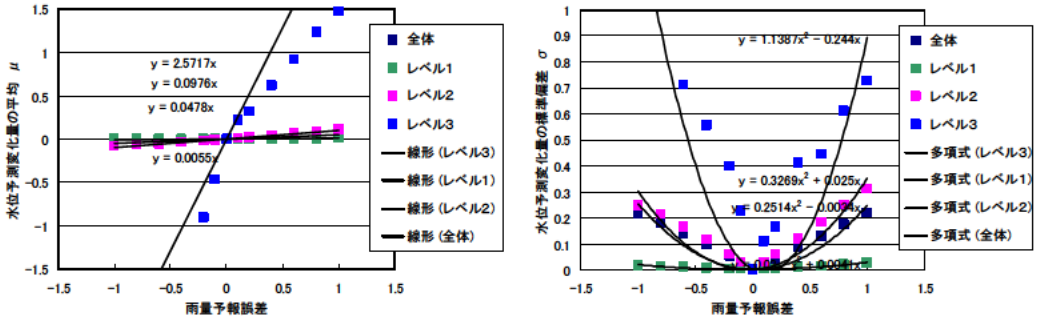


図 4-129　遠賀川 秋松橋 メッシュ雨量の水位予測変化量（６時間先予測）

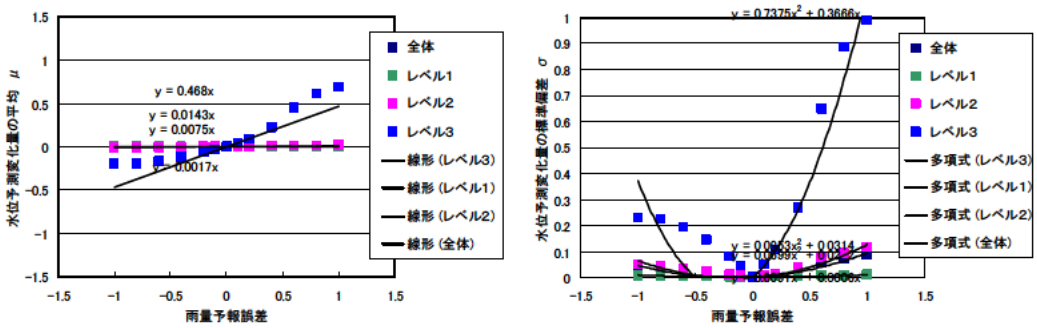


図 4-130　遠賀川 秋松橋 平均雨量の水位予測変化量（１時間先予測）

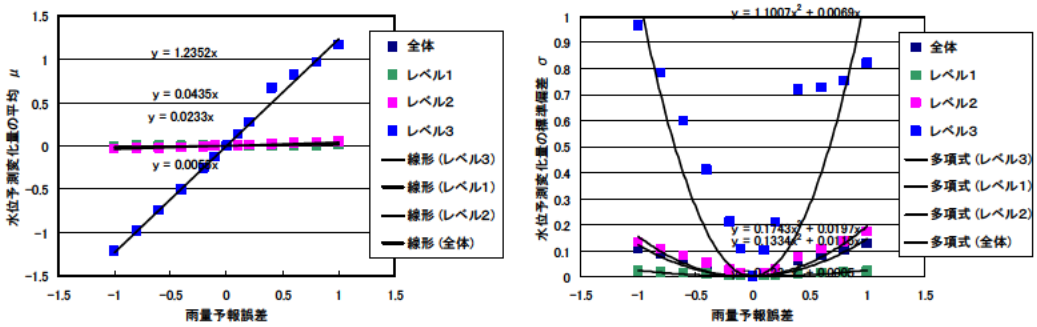


図 4-131　遠賀川 秋松橋 平均雨量の水位予測変化量（２時間先予測）

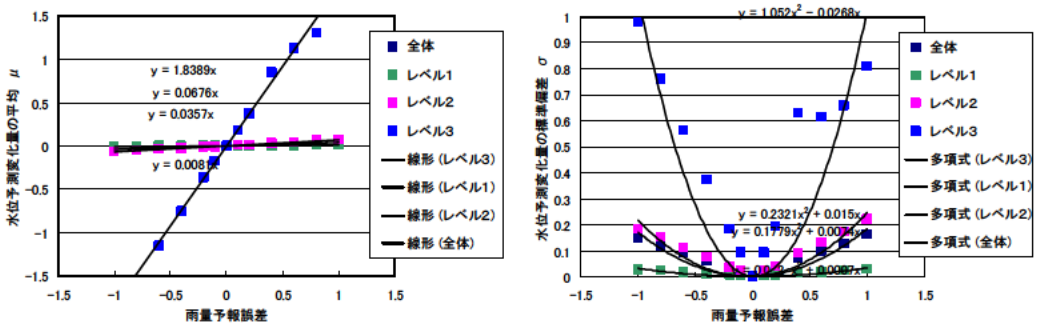


図 4-132　遠賀川 秋松橋 平均雨量の水位予測変化量（３時間先予測）

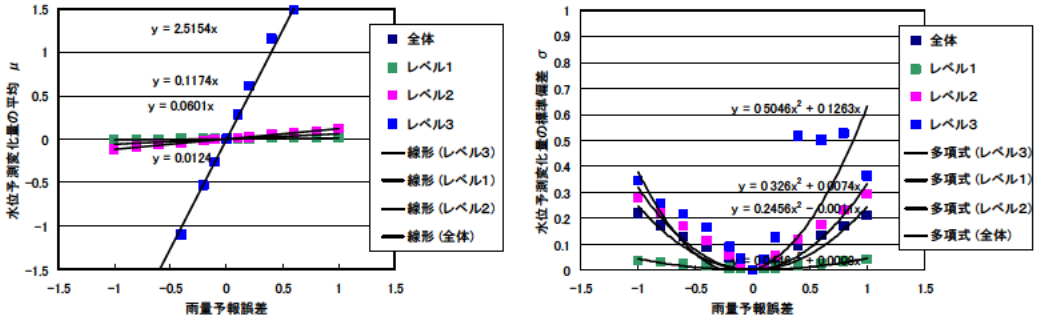


図 4-133　遠賀川 秋松橋 平均雨量の水位予測変化量（６時間先予測）

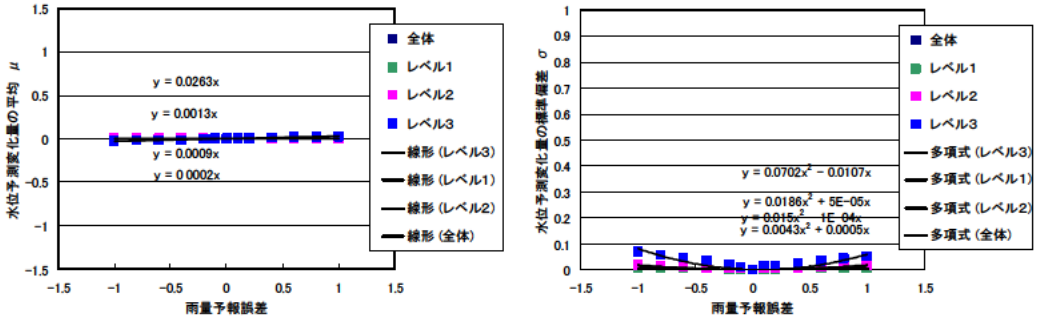


図 4-134　遠賀川 日の出橋 メッシュ雨量の水位予測変化量（１時間先予測）

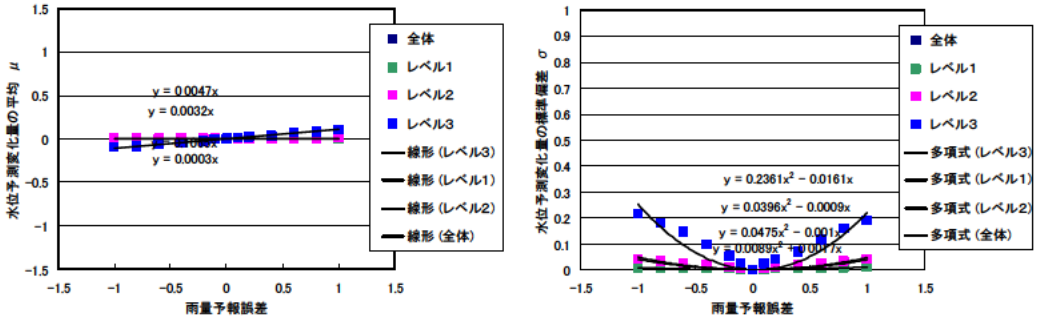


図 4-135　遠賀川 日の出橋 メッシュ雨量の水位予測変化量（２時間先予測）

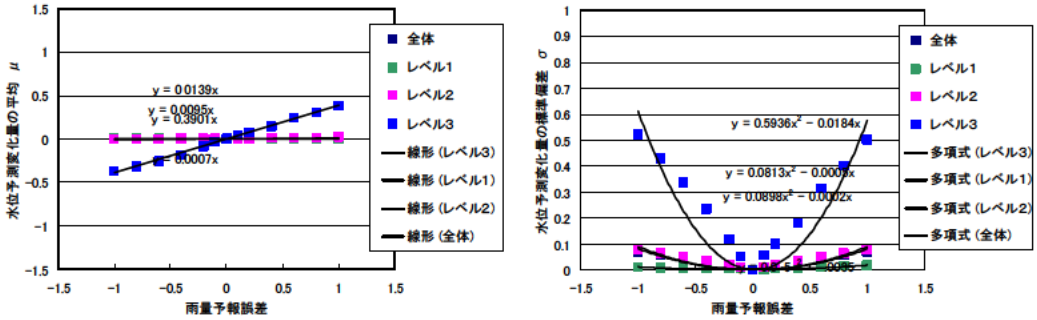


図 4-136　遠賀川 日の出橋 メッシュ雨量の水位予測変化量（３時間先予測）

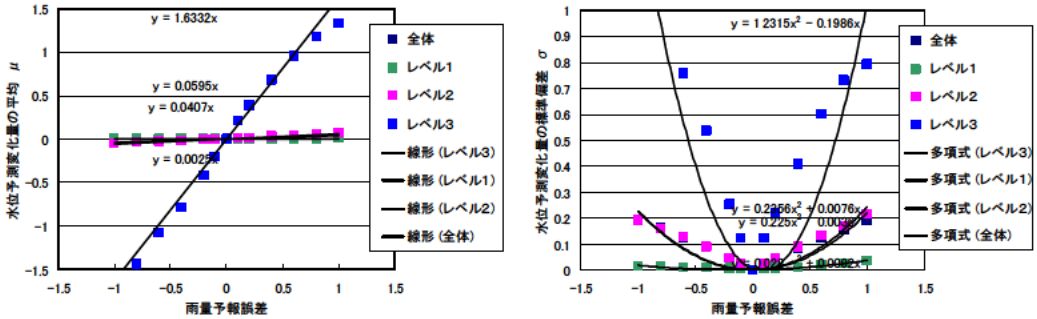


図 4-137　遠賀川 日の出橋 メッシュ雨量の水位予測変化量（６時間先予測）

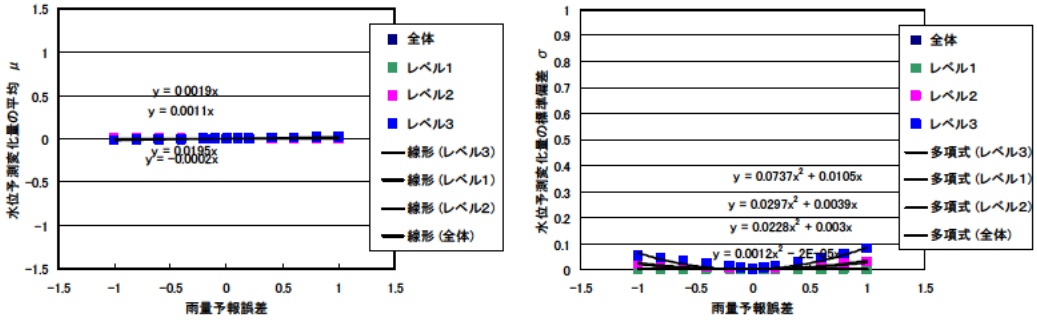


図 4-138　遠賀川 日の出橋水位 分割平均雨量の水位予測変化量（１時間先予測）

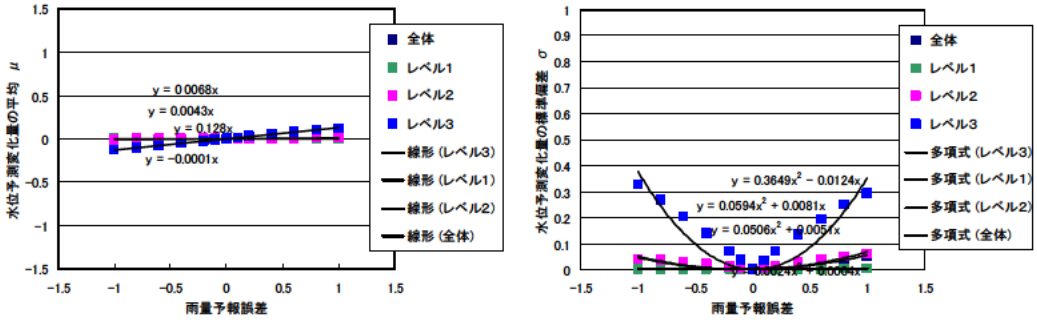


図 4-139　遠賀川 日の出橋水位 分割平均雨量の水位予測変化量（２時間先予測）

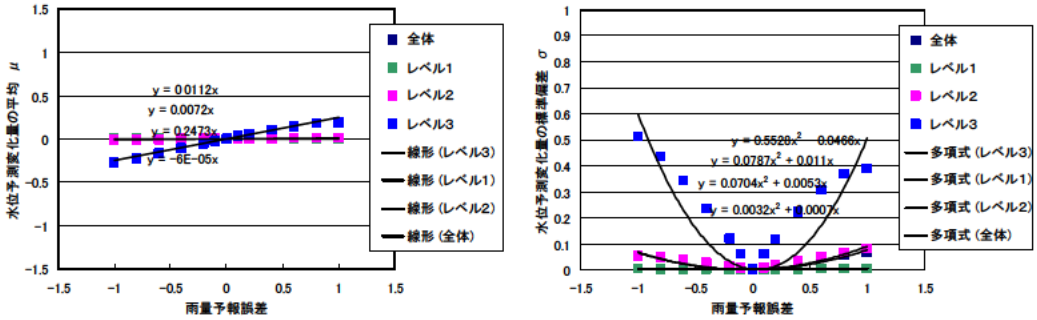


図 4-140　遠賀川 日の出橋水位 分割平均雨量の水位予測変化量（３時間先予測）

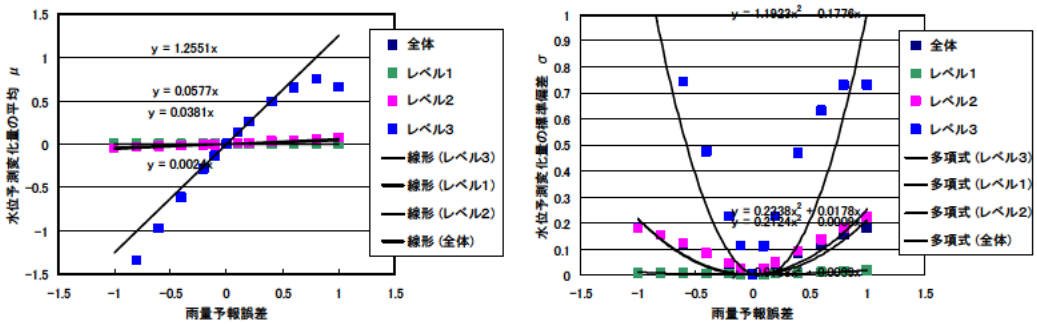


図 4-141　遠賀川 日の出橋水位 分割平均雨量の水位予測変化量（６時間先予測）

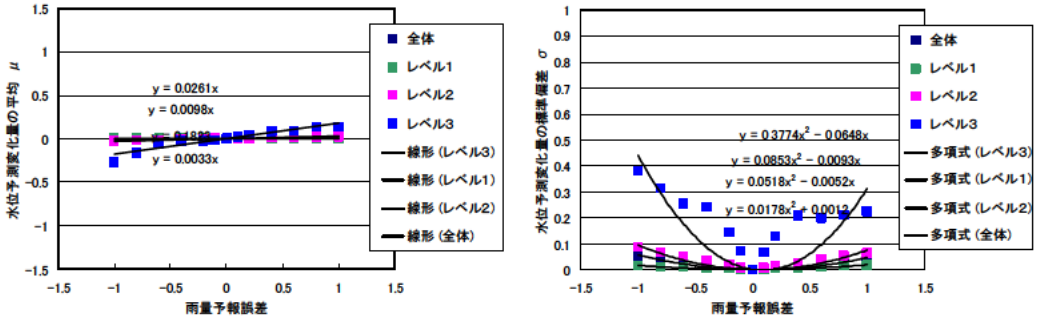


図 4-142　遠賀川野面メッシュ雨量の水位予測変化量（１時間先予測）

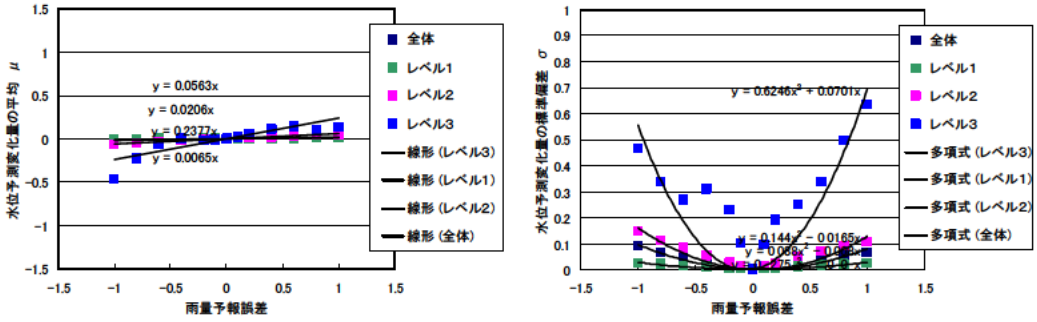


図 4-143　遠賀川野面メッシュ雨量の水位予測変化量（２時間先予測）

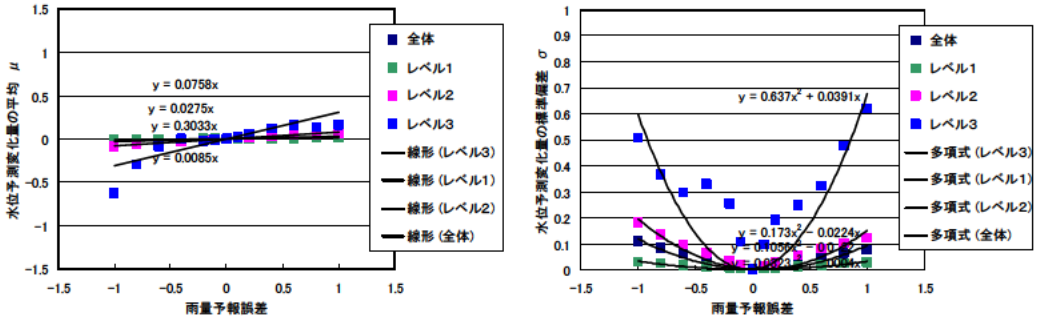


図 4-144　遠賀川野面メッシュ雨量の水位予測変化量（３時間先予測）

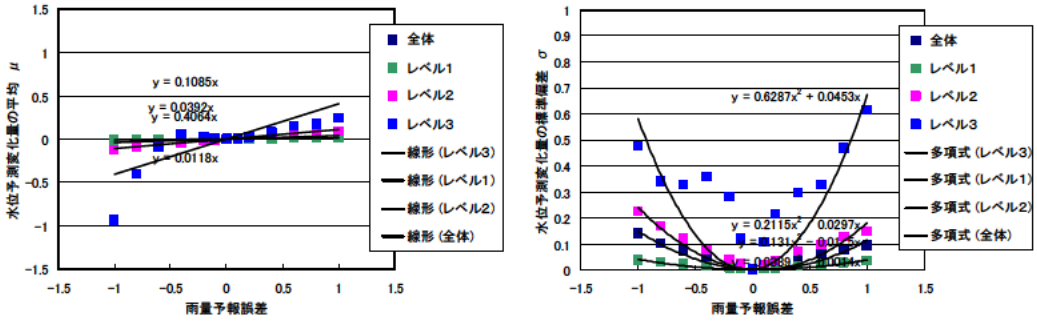


図 4-145　遠賀川野面メッシュ雨量の水位予測変化量（６時間先予測）

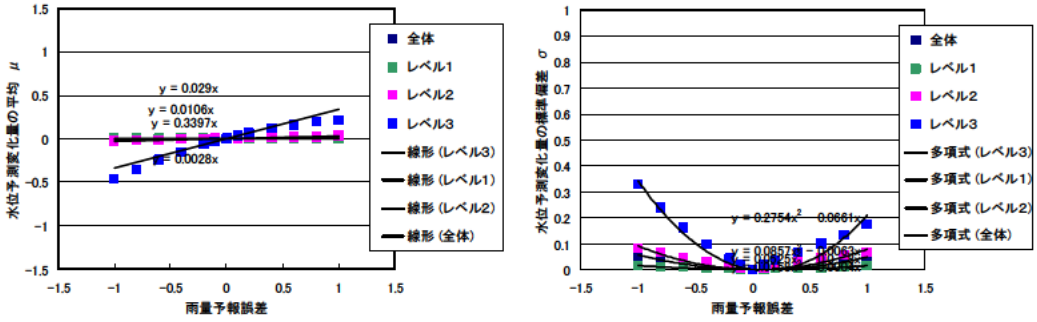


図 4-146　遠賀川 野面水位 平均雨量の水位予測変化量（１時間先予測）

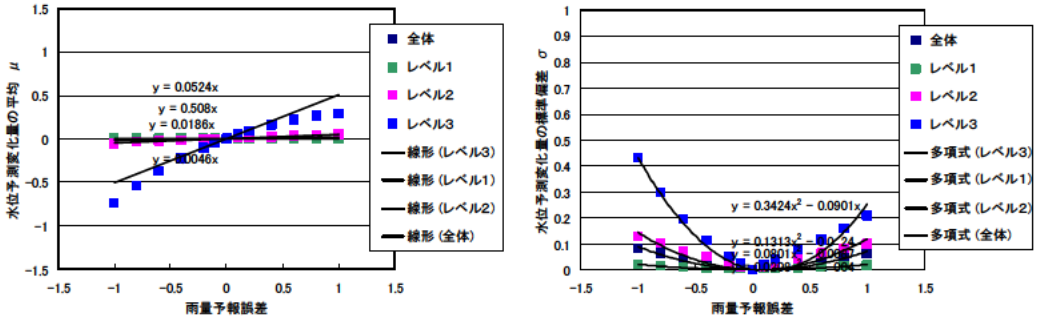


図 4-147　遠賀川 野面水位 平均雨量の水位予測変化量（２時間先予測）

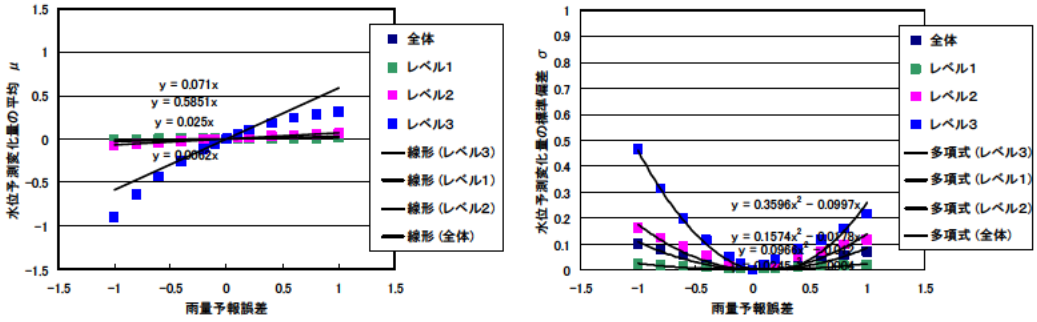


図 4-148　遠賀川 野面水位 平均雨量の水位予測変化量（３時間先予測）

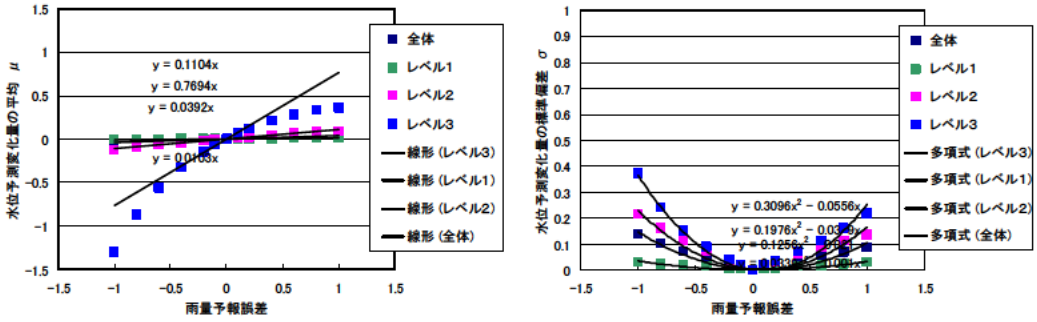


図 4-149　遠賀川 野面水位 平均雨量の水位予測変化量（６時間先予測）

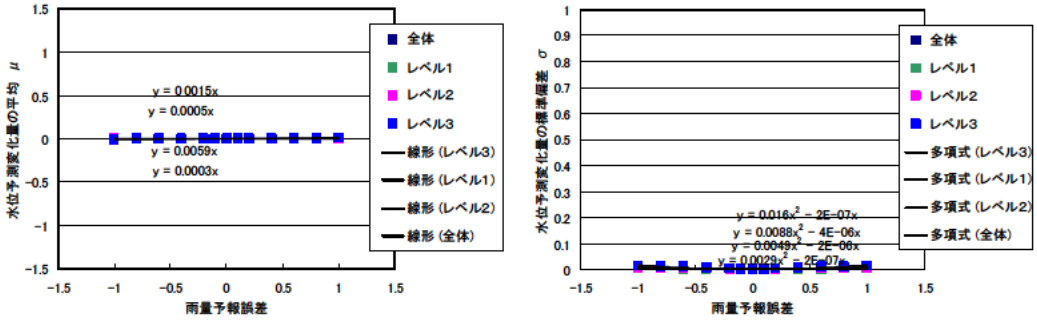


図 4-150　佐波川 新橋水位 メッシュ雨量の水位予測変化量（１時間先予測）

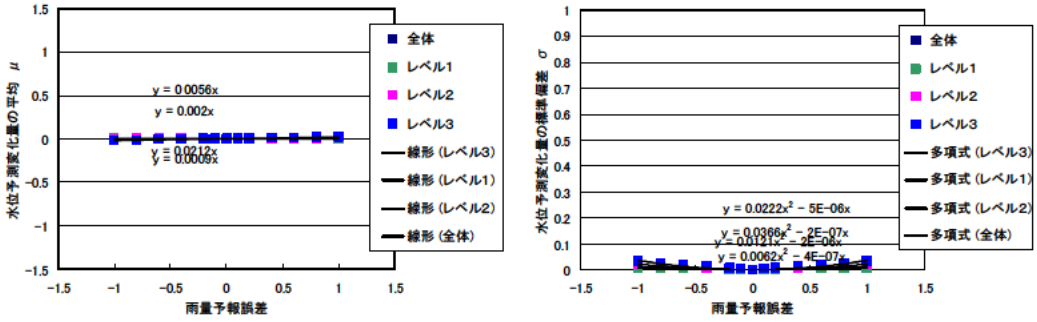


図 4-151　佐波川 新橋水位 メッシュ雨量の水位予測変化量（２時間先予測）

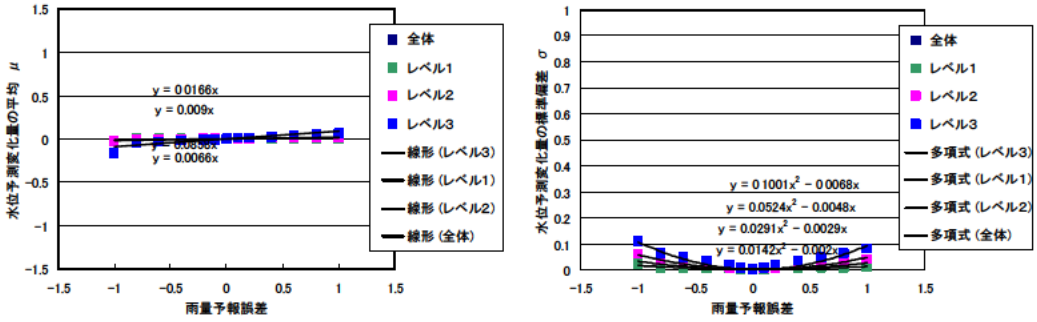


図 4-152　佐波川 新橋水位 メッシュ雨量の水位予測変化量（３時間先予測）

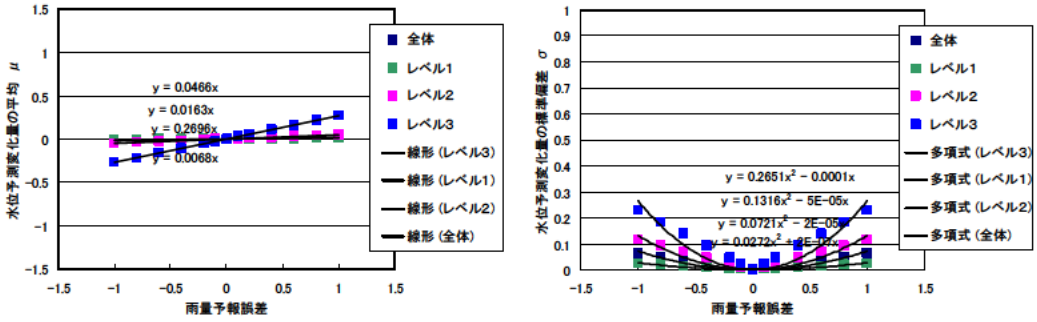


図 4-153　佐波川 新橋水位 メッシュ雨量の水位予測変化量（６時間先予測）

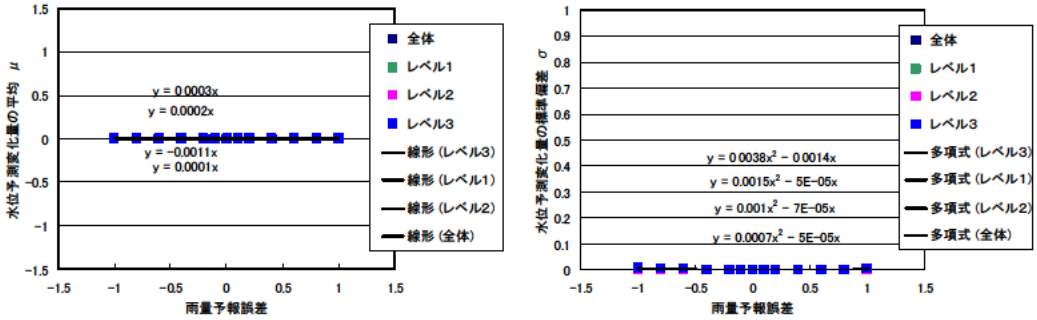


図 4-154　佐波川 新橋水位 分割平均雨量の水位予測変化量（１時間先予測）

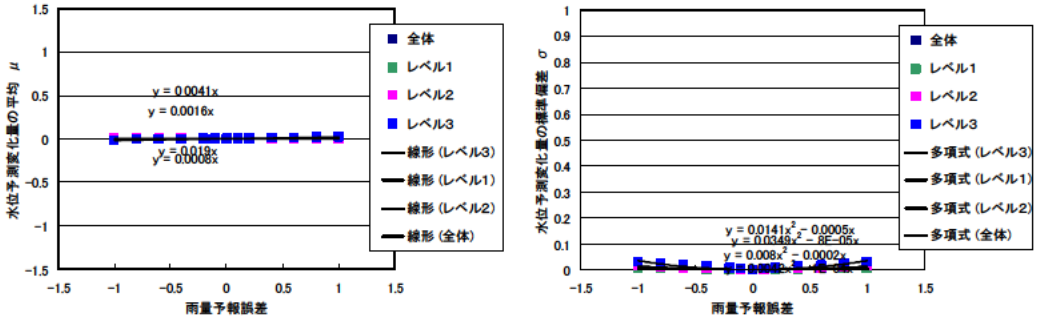


図 4-155　佐波川 新橋水位 分割平均雨量の水位予測変化量（２時間先予測）

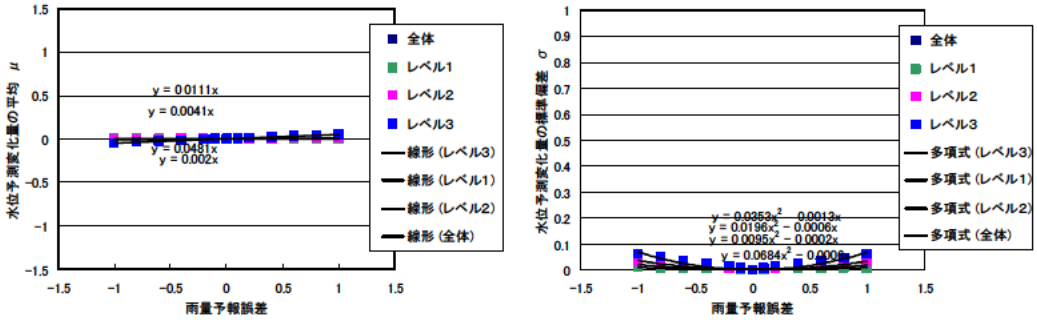


図 4-156　佐波川 新橋水位 分割平均雨量の水位予測変化量（３時間先予測）

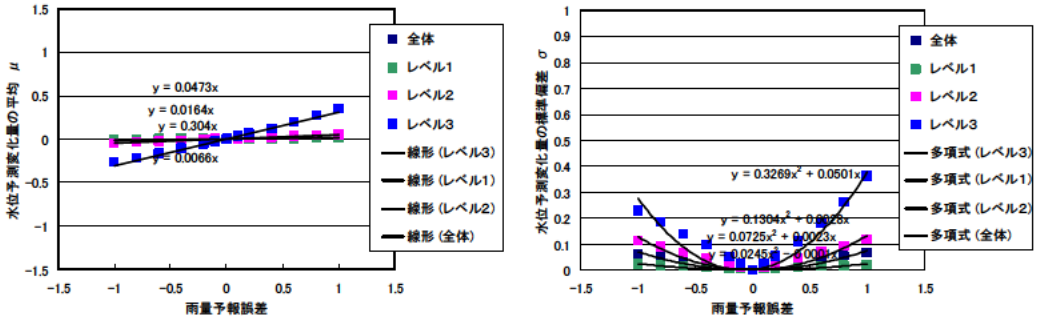


図 4-157　佐波川 新橋水位 分割平均雨量の水位予測変化量（６時間先予測）

4.5.3. 予報雨量誤差付加時の影響評価

流域面積あるいは予測先行時間に対する予測水位変化量の関係を調査するため、まず、水位予測変化量の平均値を１次式、標準偏差を２次式で近似し、それぞれの最大次数の係数を調査した。係数が大きくなるほど雨量誤差が予測水位に及ぼす影響が大きくなると見なすことができる。流域面積と感度係数（平均値、標準偏差）の関係を予測先行時間別にまとめた結果を図 4-158～図 4-161 に示す。

平均値および標準偏差の感度係数を見ると、予測先行時間が１～３時間では流域面積の小さい野面、秋松橋の感度係数が大きいが、予測先行時間が６時間になると流域面積の大きい日の出橋で感度係数が大きくなることが分かる。これは流域面積が小さい水位観測所は予報雨量の誤差が短時間で水位に影響するのに対し、流域面積が大きい水位観測所は比較的遅れて水位に影響するためと考えられる。

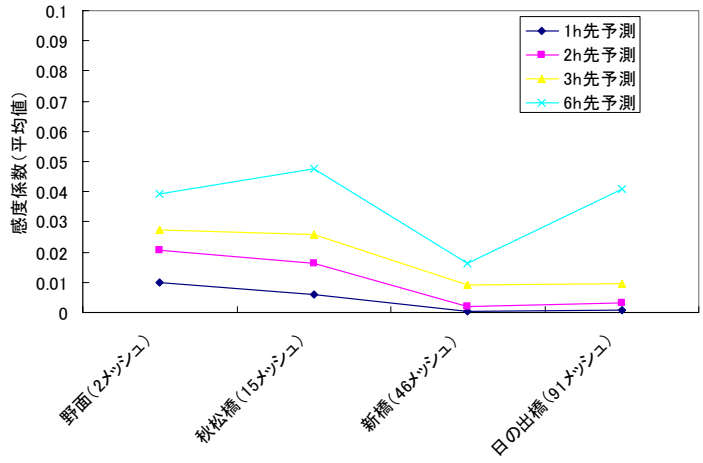


図 4-158　メッシュ雨量モデルの感度係数（平均値）

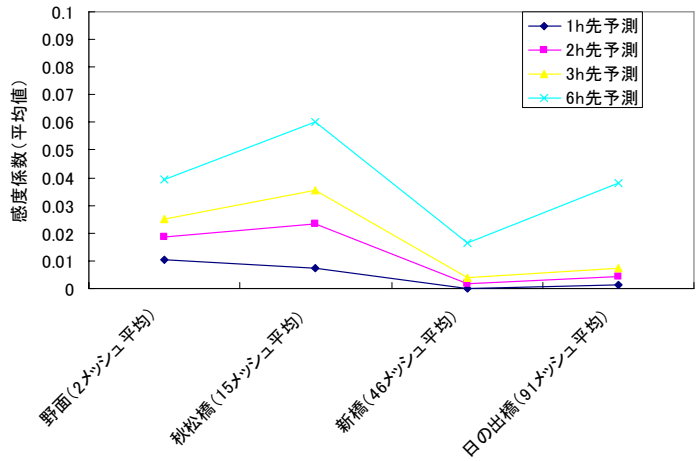


図 4-159　平均雨量モデルの感度係数（平均値）

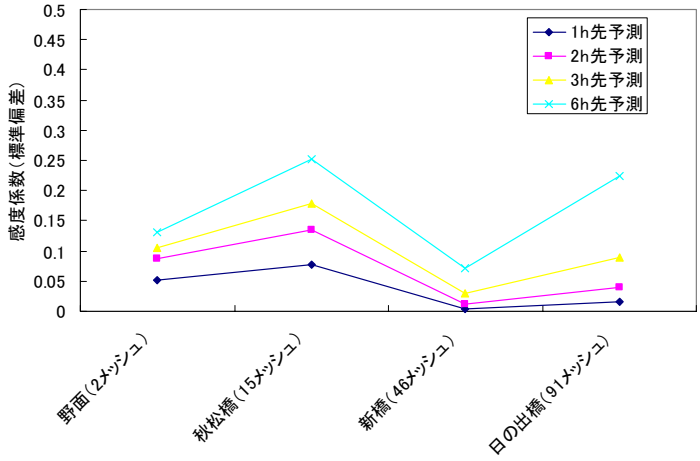


図 4-160　メッシュ雨量モデルの感度係数（標準偏差）

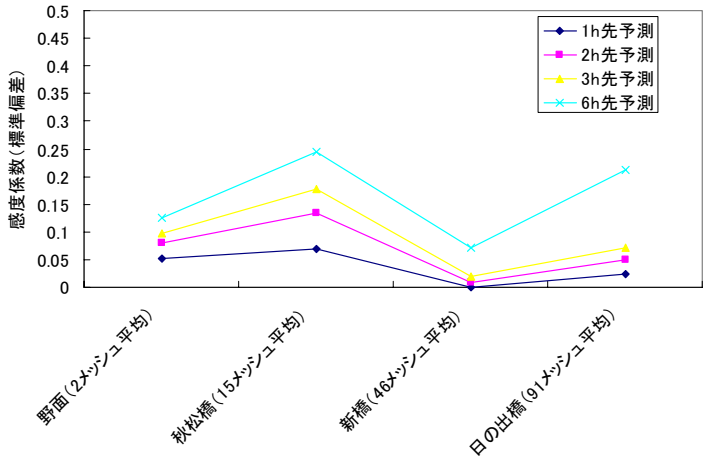


図 4-161　平均雨量モデルの感度係数（標準偏差）

次に、平均雨量モデルとメッシュ雨量モデルを比較し、平均雨量を用いた方が感度係数が小さくなるケースを表 4-19 にまとめた。平均値の感度係数を見ると、予測先行時間や流域面積の違いによる差は見られないが、低水位では平均雨量を用いた方が比較的感度係数が小さくなることが分かる。これは、雨量を平均化することにより小規模降雨に対して水位が過剰反応しなくなるためと考えられる。

一方、標準偏差の感度係数を見ると、平均雨量を用いた方が感度係数が小さくなっている。つまり、平均雨量を用いた方が雨量誤差発生時の予測水位のばらつきが小さくなることが分かる。

表 4-19　平均雨量モデルを用いた方が感度係数が小さくなるケース

水位観測所	予測先行時間	感度係数（平均値）				感度係数（標準偏差）			
		全体	低水位	中水位	高水位	全体	低水位	中水位	高水位
野面(2)	1h 先		○				○		○
	2h 先	○	○	○		○	○	○	○
	3h 先	○	○	○		○	○	○	○
	6h 先		○			○	○	○	○
秋松橋(15)	1h 先					○		○	
	2h 先					○		○	○
	3h 先					○			○
	6h 先				○	○		○	○
新橋(46)	1h 先	○	○	○	○	○	○	○	○
	2h 先	○	○	○	○	○	○	○	
	3h 先	○	○	○	○	○	○	○	○
	6h 先		○				○	○	
日の出橋(91)	1h 先		○		○		○		
	2h 先		○				○		
	3h 先	○	○	○	○	○	○	○	○
	6h 先	○	○	○	○	○	○	○	○
合計		44%	75%	44%	44%	75%	75%	75%	69%

4.5.4. まとめ

水位予測システムを実際に運用する場合には予報雨量を入力データとして使用する。つまりモデル自体が正確であっても、予報雨量に誤差が生じれば、最終結果としての水位にも誤差が生じる。そこで本検証では、佐波川、遠賀川の事例を対象とし、予報雨量の誤差が予測水位に及ぼす影響を検証した。ここでは、6 時間先までの予報雨量が 100%正確であった場合の予測水位を基準とし、予報雨量に-100%～100%の誤差が生じた際の予測水位の変化量を分析した。その結果、雨量誤差に対する水位変化量の平均値は線形関係にあり、標準偏差は 2 次の関係にあることを確認した。すなわち、正規分布を仮定した場合、ある雨量誤差に対する予測水位の変化量が一定範囲に収まることを事前に把握することが可能となり、予測水位の信頼性評価の指標として活用できると考えられる。

5. 結論

本研究では，人工知能技術の一つである遺伝的プログラミング手法を河川における洪水予測モデル構築に活用するための方法論を確立し、その適用範囲・期待できる精度を明らかにするための検討を行った[8)-11)]。具体的には、上記手法を高速かつ高精度に適用できるソフトウェアエンジンである WinmuSe®を用いた。

ここでケーススタディの対象とした流域と予測目的量は、以下に挙げるように、さまざまな流域面積・流域地形・土地利用等の特徴を有する中小河川流域における水位もしくは流量である。なお、予測モデルに入力する情報は、原則として、ある時間範囲の過去から 1 時刻先までの雨量と現時刻の水位（もしくは流量）データである。ダムや潮汐の影響を受ける河川流域においては、ダム放流量、気圧、風圧や天文潮位を入力に追加した。中小河川流域では、地上雨量観測ネットワークが不十分である場合が多いことから、ここでは、入力雨量データとして、原則としてレーダ雨量（気象庁レーダアメダス解析雨量）を用いる。これにより、流量観測は実施していなくても水位観測所さえあれば、レーダ観測領域内にある限り、全国いかなる河川流域においても、洪水予測モデルの構築が原理的には可能になるものと期待される。

- 草木ダム流入量
- 佐波川水位（地点：新橋、漆尾、堀）
- 遠賀川水位（地点：大隈、川島、勘六橋、日の出橋、野面、祇園橋、宮田橋、添田、夏吉、秋松橋）
- 酒匂川水位（地点：新甘柿橋、平山三保ダム、松田）
- 鶴見川水位（地点：寺家橋、浅山橋、末吉橋、落合橋）
- 御笠川水位（地点：山王橋）

5.1. 研究結果

本研究結果を以下に示す。

5.1.1. 対象河川流域別にみた洪水予測モデルの検証結果

【草木ダム流入量予測解析】

草木ダムの事例では、20 回分の出水データを用いてダム流入量予測モデルを構築し、それ以外の 16 回分の出水データで予測検証を実施した。200～1300m^3/s の出水ケースに対し、一部の例外を除き学習データ、未知データの全てのケースで 100m^3/s 以内のピーク誤差に収まった。本検証では地上雨量データから算出された流域平均雨量を用いたが、これをレーダー雨量に置き換えることにより局地的な雨量の影響も捉えることが可能となり、更に精度が向上するものと考えられる。一般にダム流域は降雨流出特性の変化が少なく、長

期間のデータが蓄積されていることが多いため、本手法の適用性が高く、全国のダム施設において高精度な流入量予測モデルを構築できるものと期待される。

【佐波川水位予測解析】

佐波川の事例では、2年分のデータを用いて新橋、漆尾、堀の各水位予測モデルを構築し、それ以外の1年分のデータで予測検証を実施した。本流域には佐波川ダム、島地川ダムの２つのダムがあり、予測地点の水位はダム放流量の影響を受ける。そこで本解析ではモデルの入力条件にダム放流量を追加し、ダム放流量と降雨の両方を考慮した水位予測モデルを構築した。水位の高さごとに予測先行時間と予測誤差の関係を検証した結果、予測先行時間が大きくなるほど予測誤差も大きくなるものの、6時間先の予測においてもRMSE誤差が10cm以内に収まっており、実用上十分な予測精度であることを確認した。また、学習トレースと未知データ予測の精度比較を行ったところ、学習トレースではいずれの水位観測地点においても平均雨量を用いた方が高精度であったが、未知データ予測では流域面積の大きい新橋水位でメッシュ雨量を用いた方が高精度であった。また未知データの中から10出水を抽出し、立上り・ピーク・立下りの精度評価を実施した結果、流域面積が小さい堀、漆尾地点では平均雨量を用いた方が予測精度が高く、流域面積の大きい新橋地点ではメッシュ雨量を用いた方が精度が高くなることを確認した。これは、流域面積が広くなると雨量の平均化によって雨量の分布情報が欠落するためと考えられる。本検証の結果、流域面積の大きさに応じて適切な雨量メッシュデータを入力することにより、実用上十分な精度の予測モデルを構築できることを確認した。一般的な河川流域では、上流にダム施設が設置されていることが多く、本手法の適用によりダム設備を有する全国の河川流域において高精度な水位予測モデルを構築できるものと期待される。

【遠賀川水位予測解析】

遠賀川の事例では、4年分のデータを用いて大隈、川島、勘六橋、日の出橋、野面、祇園橋、宮田橋、添田、夏吉、秋松橋の各水位予測モデルを構築し、それ以外の１年分のデータを用いて予測検証を実施した。本流域は上流から下流に至るまで様々な流域スケールを含んでいるため、水位地点ごとの予測特性を検証するのに適している。そこで本解析では、流域面積8.1km^{2}から686km^{2}までの各水位地点を選定した。なお、下流の祇園橋地点は感潮域であるため、モデルの入力条件に天文潮位、気圧、風圧を追加してモデルを構築した。水位の高さごとに予測先行時間と予測誤差の関係を検証した結果、予測先行時間が大きくなるほど予測誤差も大きくなるものの、6時間先の予測においても一部の例外を除きRMSE誤差が1m以内に収まっており、実用上十分な予測精度であることを確認した。また、学習トレースと未知データ予測の精度比較を行った結果、学習トレースではメッシュ雨量を用いた方が高精度となるケースが多くなるが、未知データ予測では逆に平均雨量を用いた方が高精度となるケースが多くなり、平均雨量モデルを用いた方が未知データに対する予測安定性が高くなることを確認した。また未知データの中から10出水を抽出し、立上り・ピーク・立下りの精度評価を実施した結果では、流域面積が大きい水位観測地点ほど平均雨量モデルの予測精度が高くなることを確認した。これは、メッシュ雨量間の相関が高い場合、メッシュ雨量と水位の因果関係をメッシュごとに正しく同定することが困難となるためである。学習トレースでは誤差が小さくても、未知データ予測で

誤差が増大するのはこのためである。本検証の結果では、適切な雨量データを入力することにより、実用上十分な精度の予測モデルを構築できることを確認した。本手法の適用により、全国の様々な流域スケールの河川において高精度な水位予測モデルを構築できるものと期待される。

【酒匂川水位予測解析】

酒匂川の事例では、2年分のデータを用いて新甘柿橋、平山三保ダム、松田の各水位予測モデルを構築し、それ以外の1年分のデータを用いて予測検証を実施した。本河川は、静岡県および神奈川県を流れる２級河川であり、中流には三保ダムが配置されている。本解析では、三保ダム下流の水位予測と上流にダムの無い地点の水位予測を実施した。水位の高さごとに予測先行時間と予測誤差の関係を検証した結果、予測先行時間が大きくなるほど予測誤差も大きくなるものの、一部の例外を除き RMSE 誤差が 20cm 以内に収まっており、実用上十分な予測精度であることを確認した。また、学習トレースと未知データ予測の精度比較を行った結果、学習トレースでは高水位を除き平均雨量を用いた方が高精度となり、未知データ予測では全ての水位レベルで平均雨量を用いた方が高精度となった。また未知データの中から 10 出水を抽出し、立上り・ピーク・立下りの精度評価を実施した結果では、平均雨量を用いた方が予測精度が高くなるケースが多いことを確認した。このことから、高水位では少なくとも平均雨量を用いた方が未知データに対する予測安定性が高くなることが分かる。本検証の結果では、適切な雨量データを入力することにより、実用上十分な精度の予測モデルを構築できることを確認した。本手法の適用により、ダム設備を有する全国の河川流域や、ダムを含まない河川流域において高精度な水位予測モデルを構築できるものと期待される。

【鶴見川水位予測解析】

鶴見川の事例では、2年分のデータを用いて寺家橋、浅山橋、末吉橋、落合橋の各水位予測モデルを構築し、それ以外の1年分のデータを用いて予測検証を実施した。鶴見川は近年急速に都市化が進んでいる代表的な都市型河川であり、効果的な治水対策が重要な河川流域である。

本解析では、下水等の取排水設備の影響を無視し、降雨と水位のデータから水位予測モデルを構築した。なお、下流の末吉橋地点は感潮域であるため、モデルの入力条件に天文潮位、気圧、風圧を追加してモデルを構築した。水位の高さごとに予測先行時間と予測誤差の関係を検証した結果、予測先行時間が大きくなるほど予測誤差も大きくなるものの、一部の例外を除き RMSE 誤差が 0.7m 以内に収まっており、実用上十分な予測精度であることを確認した。また、学習トレースと未知データ予測の精度比較を行った結果、学習トレースでは高水位を除き平均雨量を用いた方が高精度となり、未知データ予測では全ての水位レベルで平均雨量を用いた方が高精度となった。また未知データの中から 10 出水を抽出し、立上り・ピーク・立下りの精度評価を実施した結果では、平均雨量を用いた方が予測精度が高くなるケースが多いことを確認した。このことから、高水位では少なくとも平均雨量を用いた方が未知データに対する予測安定性が高くなることが分かる。本検証の結果では、取排水設備の影響を無視し、適切な雨量データを入力することにより、実用上十分な精度の予測モデルを構築できることを確認したが。今後、取排水設備の運用データを入力情報に追加すること

が出来れば更に精度が向上すると考えられる。本手法の適用により、全国の都市型河川においても高精度な水位予測モデルを構築できるものと期待される。

【御笠川水位予測解析】
御笠川の事例では、約2年分のデータを用いて山王橋の水位予測モデルを構築し、約1年分のデータ用いて予測検証を実施した。御笠川は都市型河川であり、山王橋水位地点は潮汐の影響を受ける感潮域である。本検証では、モデルの入力条件に天文潮位、気圧、風圧を追加してモデルを構築した。未知データの中から3出水を抽出し、ピークの精度評価を実施した結果、いずれもピーク誤差が30cm未満に収まっており、実用上十分な予測精度であることを確認した。一般的に感潮河川は流量観測が困難であり、またH-Q曲線が使用できないことから単純な流出解析手法では水位予測が困難とされていたが、本手法の適用により全国の感潮域において水位予測モデルの構築が可能になるものと期待される。

5.1.2. モデル特性に関する検証結果

5.1.1章により、、様々な特徴を有する河川流域において水位/流量予測モデルを構築し、いずれの流域においても良好な精度で水位/流量を予測できることを確認した。これらのケーススタディの成果を元に、最適なデータ入力方法、未曾有の出水に対する予測精度、予報雨量利用時の影響についてさらに分析し検証した。

【洪水到達時間と相互情報量の関係】
降雨の流出遅れの効果を予測に反映させるため、モデルの入力変数として、予測開始時刻の雨量だけでなく、ある時間範囲の過去雨量も追加する必要がある。流出遅れに関する水文学的指標として洪水到達時間が知られているが、これを求めるためには、対象出水の選別や雨量/水位ピークの判別等、水文学における豊富な経験と高度な専門知識が必要となる。そこで本検証では、情報工学分野の観点から相互情報量解析による洪水到達時間の決定方法を提案し、水文学的な洪水到達時間との比較分析を行った。ここでは、佐波川、鶴見川、遠賀川の各水位観測地点を対象とし、相互情報量解析から推定される洪水到達時間と水文学的観点から推定される洪水到達時間を比較した。情報工学的な方法では、低水から高水を含む数年分のデータを用いて相互情報量解析を実施し、水位に対する雨量の情報量が最大となる時間差を洪水到達時間とした。一方、水文学的な方法では、主要な10出水を対象とし、各出水の雨量ピークと水位ピークの時間差を2倍し、この平均値を洪水到達時間とした。その結果、全ての水位観測地点において、いずれの方法についても同程度の洪水到達時間となることを確認した。相互情報量解析を適用することにより、人的な判断を伴うことなく、客観的かつ効率的に河川流域ごとの洪水到達時間を算出することが可能となる。

【水位過去参照時間の検証】

初期条件としての水位（あるいは流量）の入力方法について検討を行った。予測開始時刻の水位だけでなく、ある時間範囲の過去水位も追加することにより予測精度を向上できるかを検証した。ここでは、草木ダムおよび佐波川の事例を対象に、初期水位の過去参照時間の違いによる予測精度への影響を評価した。

草木ダム、佐波川の RMSE 評価によると、過去参照時間を１時間、すなわち現在水位のみ初期条件としたモデルが最も精度が高くなることを確認した。ただし佐波川においては、ピークの予測精度に着目すると過去参照時間を 15 時間としたモデルが最適であると考えられる。本検証の結果、雨量の過去参照時間の検証結果と同様、流域に応じて適切な初期条件の参照時間が存在することが分かった。

【平均雨量とメッシュ雨量を組み合わせたモデル検証】

各河川流域のケーススタディにおいて、メッシュ雨量を用いた方が高精度になる場合と平均雨量を用いた方が高精度になる場合があることを確認した。メッシュ雨量を用いれば詳細な雨量分布を入力することが出来るものの、メッシュ雨量同士の相関が高いため、多様な雨量データが十分揃わなければ各メッシュ雨量と水位との関係を正確に同定することが困難となる。一方、平均雨量を用いると詳細な雨量分布が失われるため、雨量分布のパターンの違いを予測水位に反映することが出来ないが、多様な雨量データが揃っていない場合においても一定精度のモデルを同定することが出来る。本検証では、遠賀川、佐波川の事例を対象とし、流域に応じた最適なメッシュ雨量の入力方法を検討した。水位地点から離れた上流域は平均雨量、水位地点に近い領域はメッシュ雨量として入力することとし、領域の比率を数パターン設定して比較分析した。その結果、いずれの水位観測地点においても、全メッシュの２割をメッシュ雨量とし、残りの８割を平均雨量とした場合に最も予測精度が高くなることを確認した。本検証で得られた知見は、様々な河川流域において水位予測モデルを作成する際の指針として活用できるものと期待される。

【超過洪水時の予測精度評価】

各河川流域のケーススタディでは、モデルを実際に運用することを想定し、１年分の未知データを用いて予測精度を検証した。その結果、学習範囲を大きく逸脱しない出水に対しては良好な精度で予測できることを確認した。しかしながら、学習範囲を大きく逸脱する出水が発生した場合の予測精度についても検証しておく必要がある。そこで本検証では、鶴見川、遠賀川、佐波川、酒匂川、御笠川、草木ダムの各河川流域を対象とし、最大ピークの出水期間を除外したデータを学習し、生成されたモデルを用いて最大出水を予測することにより未曾有の出水に対する予測精度を評価した。その結果、一部の水位観測地点を除き、予測水位が低めとなるケースが多いことが分かった。しかし、最大出水相当のデータを学習することができれば、それと同じ規模の洪水については十分な精度のモデルを構築できることが分かった。また、十分なデータが揃っている場合はメッシュ雨量を用いた方が高精度な予測を行えるが、今回の検証のように数年間のデータしか与えられていない場合においては、平均雨量を用いることにより大幅な精度悪化を回避でき、超過洪水に対する予測安定性を増すことができることが分かった。

【予報雨量誤差が予測水位に及ぼす影響評価】

実際に水位予測システムを運用する場合には予報雨量を入力データとして使用する。つまりモデル自体が正確であっても、予報雨量に誤差が生じれば、最終結果としての水位にも誤差が生じる。そこで本検証では、佐波川、遠賀川の事例を対象とし、予報雨量の誤差が予測水位に及ぼす影響を検証した。ここでは、６時間先までの予報雨量が 100%正確であった場合の予測水位を基準とし、予報雨量に-100%～100%の誤差が生じた際の予測水位の変化量を分析した。その結果、雨量誤差に対する水位変化量の平均値は線形関係にあり、標準偏差は 2 次の関係にあることを確認した。すなわち、正規分布を仮定した場合、ある雨量誤差に対する予測水位の変化量が一定範囲に収まることを事前に把握することが可能となり、予測水位の信頼性評価の指標として活用できると考えられる。

5.2. 研究成果

これらの研究結果をもとにして、本研究で得られた結論をまとめると以下のようになる。

（1） WinmuSe®を洪水予測に適用するにあたって、入力情報と出力情報との基本的な相関関係を確認し、目的量を高効率に高精度で予測できる入力情報（変数）セットを見定めるために、ADE（Advanced Data Evaluater）を用いた相互情報量解析を行うことが一般に必要となる。そこで、佐波川，鶴見川，および遠賀川の事例をもとに、ある時間範囲の降雨量データを入力として相互情報量分析を行い、その結果得られる入力情報としての降雨量データに求められる過去時間範囲を調べたところ、降雨流出関係の実績データから推定される洪水到達時間とほぼ等しいことがわかった。つまり，WinmuSe®を用いた洪水予測モデル構築にあたって入力情報とすべき過去雨量については、洪水到達時間程度の時間範囲の雨量データを設定すればよいことがわかった。このことは、流域の降雨から流出に至る物理的・経験的な関係とよく対応しており、ADEによる相互情報量解析の結果や、PAC（Program Auto Creation）による洪水予測モデルの構築に関する基本的なチェック項目としても有効である。

（2） 洪水予測モデルの入力情報としてのレーダ雨量について、ある面積平均値を与えて学習させた場合と、メッシュ雨量をそのまま与えて学習させた場合の洪水予測精度の違いについて、佐波川と遠賀川の事例において比較分析をおこなった。そこでは、予測雨量ではなく実績雨量を入力値として与えることで、降雨予測自体には誤差が全くない仮想的な条件を想定し、雨量分布の与え方の違いのみを分析することとした。その結果、流域面積の小さい佐波川においてはメッシュ雨量による予測精度が高く，流域面積の大きい遠賀川においては平均雨量による予測精度が高い結果となった。一般的には，雨量平均化により雨量分布の情報が失われるため，メッシュ雨量による予測精度の方が局地的な雨量分布の偏りを的確に計算結果に反映させることで、予測精度が高くなると期待しがちである。しかし実際には、すべてのメッシュ雨量値と予測対象の流域末端での流出量との因果関係を定式化するだけの十分な既知の情報を得ることは難しいことをこの結果は示しているものと解釈できる。したがって、特にメッシュ数が多くなる大きな流域においては、メッシュ雨量ではなく平均雨量を入力情報として与える手法をとる方が、さまざまな時系列パターンを有するその平均雨量と流出量との関係を十二分に学習させるだけの情報を確保し、洪水予測の安定性を担保する意味で有利であると考えられる。

（3） 次に、同じ２河川流域について、実際の予測雨量を用いて洪水予測を行う際に、同様に平均雨量とメッシュ雨量で与えるケースを比較したところ、平均雨量を用いた方が雨量誤差発生時の予測水位のばらつきが小さくなることを確認した．さらに、ジャックナイフ法を用いて、仮想的に未学習の超過洪水を予測する事例を作成して、そこでの予測精度の検証を行ったところ、やはりメッシュ雨量よりも平均雨量を用いた方が全体として予測精度が安定することが確認された。これらの結果に

より、(2)と同様に、一般的には、平均雨量を活用し入力情報を過度に増やさない方が、洪水予測の安定性の面から望ましいことが明らかとなった。

（4） そこで本研究では、予測安定性に優れた平均雨量入力タイプの予測モデルと，雨量分布の情報を扱えるメッシュ雨量入力タイプの予測モデルのそれぞれの特長を併せ持つ「分割平均雨量入力モデル」，即ち水位観測所近傍では雨量メッシュ，水位観測所から離れた領域は平均雨量を用いたモデルを提案し，佐波川および遠賀川の事例を基に予測精度を検証した．その結果，流域全体の約２割の近傍エリアをメッシュ雨量，残りの約８割の領域を平均雨量として入力する予測モデルを構築した場合に、最も予測精度が高くなることを確認した．この雨量入力手法及びその配分比については、他の河川における洪水予測モデルを構築する際の指針として利用できると期待される．

（5） 学習範囲を超える超過洪水の予測精度を、鶴見川、遠賀川、佐波川、酒匂川、御笠川、草木ダムの事例において検証した。最大出水期間を除外したデータを学習し、生成されたモデルを用いて最大出水の予測精度を分析した結果、水位/流量が低めに予測されるケースが多いことを確認した。また、同規模の出水事例を学習することにより超過洪水の予測誤差を十分低減できることを確認した。このことから、学習データに中小クラスの出水だけでなく既往最大出水のデータを含めることにより、近年多発しているゲリラ豪雨等による未曾有の出水においても学習範囲内の出水として高精度に予測できると考えられる。

（6） 予報雨量の誤差が予測水位に及ぼす影響を評価するため、遠賀川と佐波川の事例において検証を行った。実績雨量に一定割合の誤差相当量を付加した場合の予測水位の変化量について、平均と標準偏差を解析した結果、平均値は雨量変化量に対して比例関係にあり、標準偏差は雨量変化量に対して２次の関係にあることが分かった。この精度解析手法は、予報雨量誤差に対する予測水位の変動特性を把握する際の評価方法として有効であると考えられる。

（7） 以上の特徴を十分理解した上であれば、人工知能エンジン WinmuSe®を活用した洪水流出解析モデル構築手法は、全国の河川での迅速かつ効率的な洪水予測システム構築等に有効であると考えられる。但し、河川水位に影響する諸要素の因果関係を定量的に把握した上での降雨－流出関係の把握が必要とされる解析の場合には、本手法で構築した流出解析モデルは流出の内部プロセスをブラックボックス的に扱うことになるため注意が必要である。本研究で明らかにした、人工知能に基づく流出解析の特徴を生かした利活用を行うことが、重要である。

6. 今後に残された課題

本研究成果により、人工知能を活用した洪水予測モデルの特性・活用できる範囲が相当程度明らかとなり、現場での実践による洪水災害軽減への具体的な貢献が期待される段階になったと考える。

今後の課題としては、以下が挙げられる。

1） 超過洪水時の予測について，予測精度が悪化する傾向が見られた．今後，外挿条件と言えるような極値的洪水事例における安定性確保について、さらに検討することが必要である。

2） 実用的には，水位は高めに予測される方が安全であり，予測誤差（予測値－実績値）がマイナスとなることは望ましくない．一方，本報技術による予測誤差は概ねゼロを中心とした正規分布を形成すると考えられる．今後，誤差がマイナスとなる状況を事前に特定する等して，予測実用性を高める方策を検討することも重要である。

3） 本手法で構築した流出解析モデルは、過去の実績に基づくモデルであることから、河川流域の気候や流域環境条件が変化した場合には、モデルが適用できなくなる場合も想定される。どの程度までの変化にまでモデルが対応可能であるかについても、長期経年的な検証が必要である。.

これらの課題については、（独）土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター（ICHARM）等において、可能な範囲で今後もフォローアップに努めることとしたい。

参考文献

1) JFE エンジ：muSe でプラントの最適運転を支援，エンジニアリング・ビジネス，Vol.24(22)，pp.6-7，2004 年.

2) 四俵正俊 : ニューラルネットワークを用いた流出計算，水文・水資源研究のための AI 技術利用に関するシンポジウム論文集，水文・水資源学会，1992 年 11 月.

3) 藤田睦博 : ニューラルネットを用いた流出予測，水文・水資源研究のための AI 利用技術に関するシンポジウム論文集，水文・水資源学会, 1992 年 11 月.

4) 例えば、神田徹，藤田睦博「新体系土木工学 26 水文学－確率論的手法とその応用－」，土木学会編.

5) 小尻利治 : 水資源管理への人工知能の導入，「水資源工学」第 11 章，pp.106-119，朝倉書店，2006 年 10 月.

6) 伊庭斉志，佐藤泰介 : システム同定アプローチに基づく遺伝的プログラミング，人工知能学会誌，Vol.10, No.4，pp.590-600，1995 年 7 月.

7) 河合弘泰，富田孝史：台風による内湾の高潮のリアルタイム予測に関する基礎的検討，港湾空港技術研究所資料，No.1085，2004 年 9 月.

8) 渡辺直樹，山根総一郎，深見和彦，今村仁紀，川原恵一郎，吉延広枝：遺伝的プログラミングによる洪水予測モデル同定の試み～草木ダム流入量を対象とした事例研究～，土木学会第 62 回年次学術講演会，2007 年 9 月.

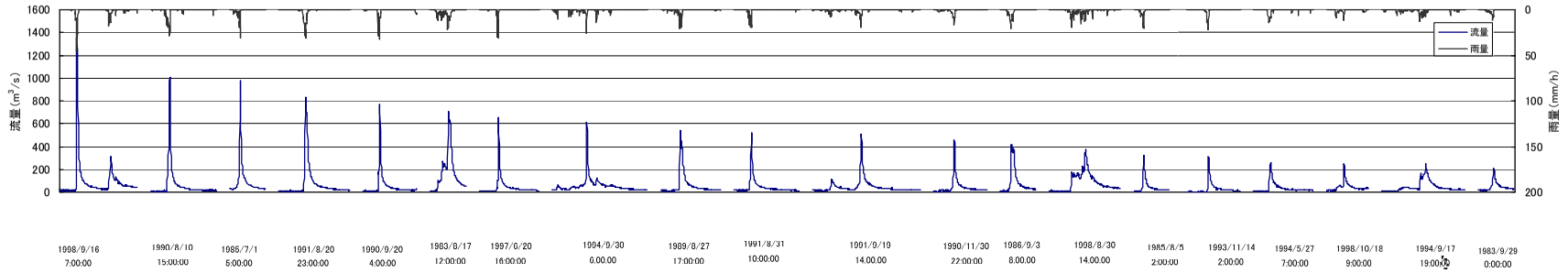
9) 渡辺直樹，山根総一郎，今村仁紀，深見和彦：遺伝的プログラミングを活用した洪水予測技術の開発～草木ダム及び佐波川におけるケーススタディ～，河川技術論文集，第 14 巻，2008 年 6 月.

10) 寺沢英樹，安間利貴，園田克樹 : 遺伝的プログラミングによる潮位予測モデル同定の試み～東京湾（新木場）を対象とした事例研究～，水文・水資源学会 2007 年度研究発表会，2007 年 7 月.

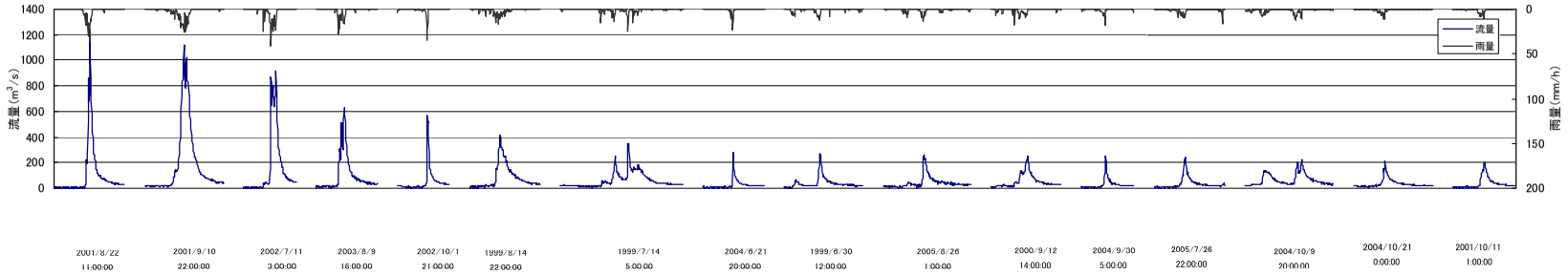
11) Naoki Watanabe, Kazuhiko Fukami, Hitoki Imamura, Katsuki Sonoda, and Soichiro Yamane：Flood Forecasting Technology with Radar-Derived Rainfall Data Using Genetic Programming，2009 International Joint Conference on Neural Networks，2009 年 6 月.

巻末資料（その１）

草木ダムデータ



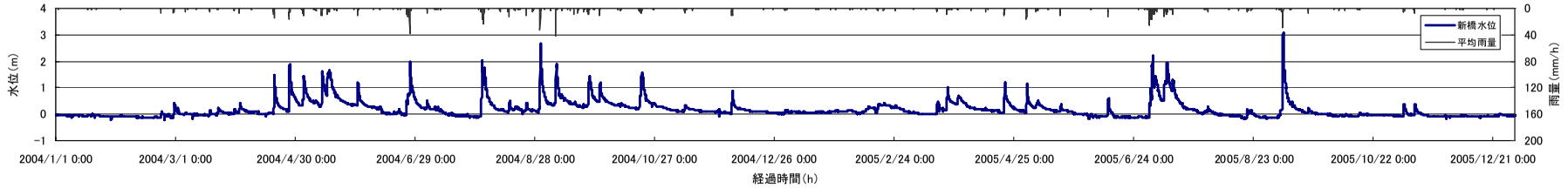
学習データ



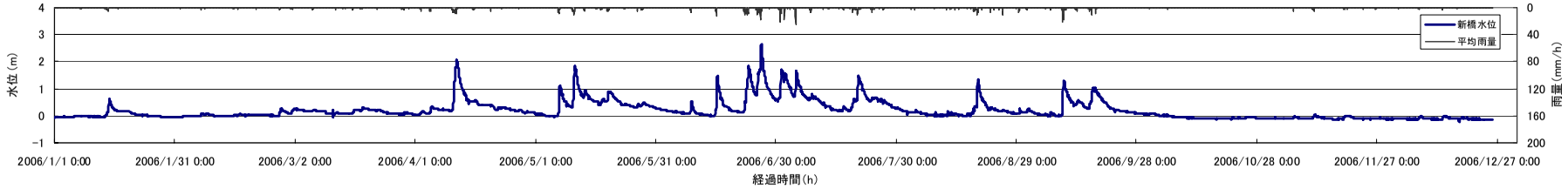
未知データ

佐波川データ

新橋地点

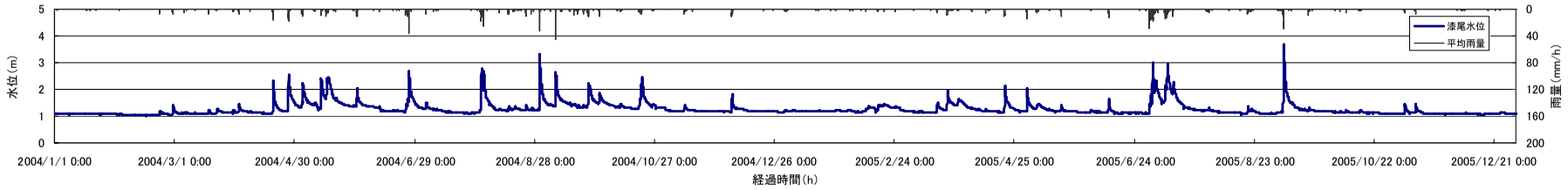


2004～2005 年（学習データ）

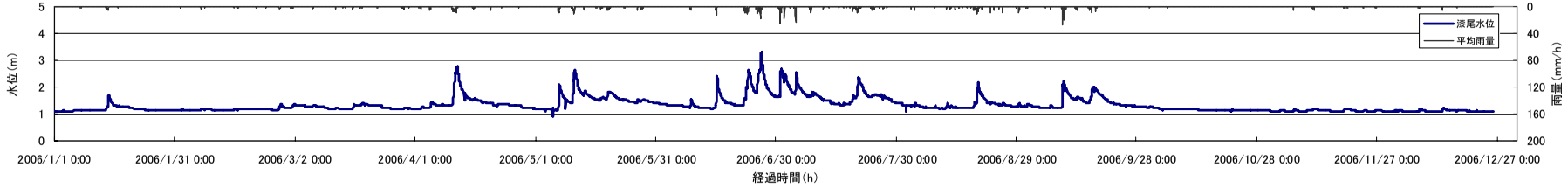


2006 年（未知データ）

漆尾地点

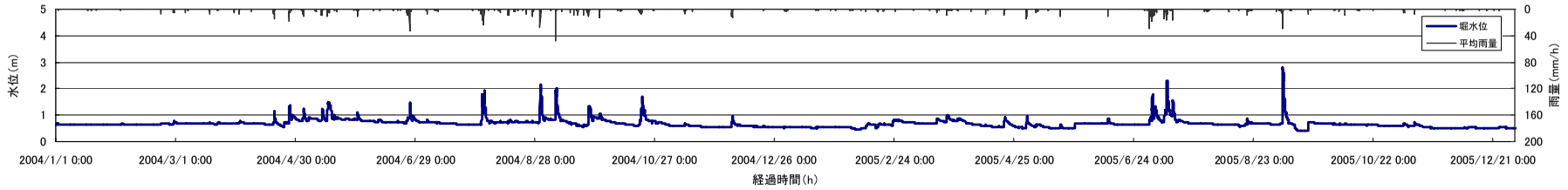


2004～2005 年（学習データ）

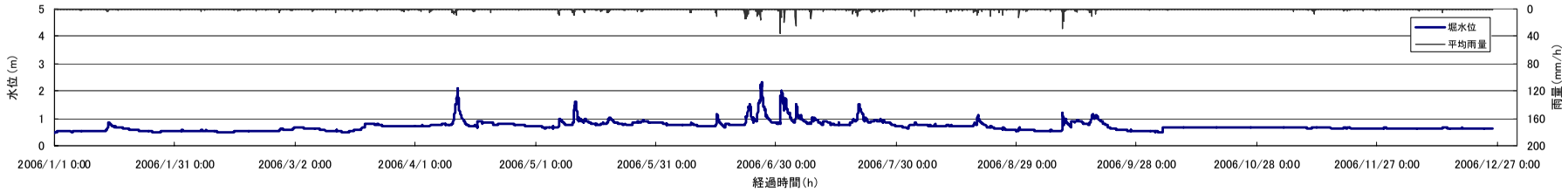


2006 年（未知データ）

堀地点



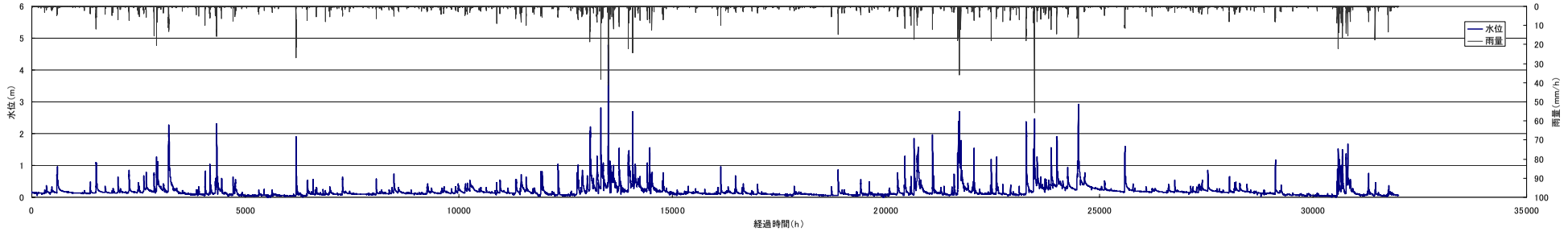
2004～2005 年（学習データ）



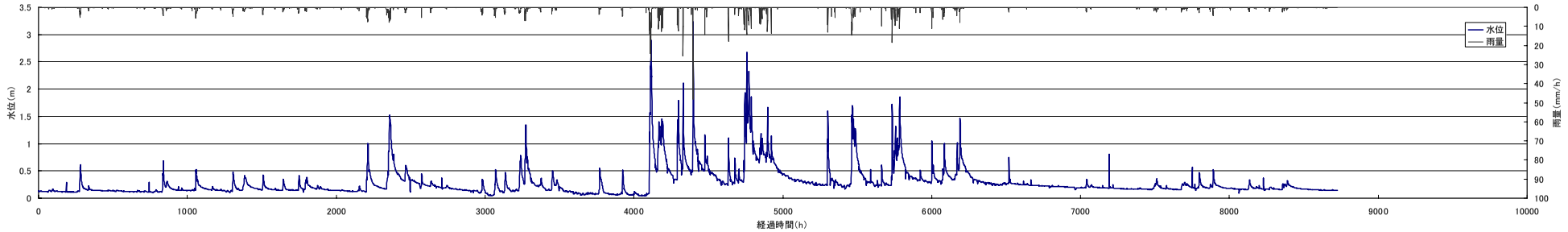
2006 年（未知データ）

遠賀川データ

夏吉地点

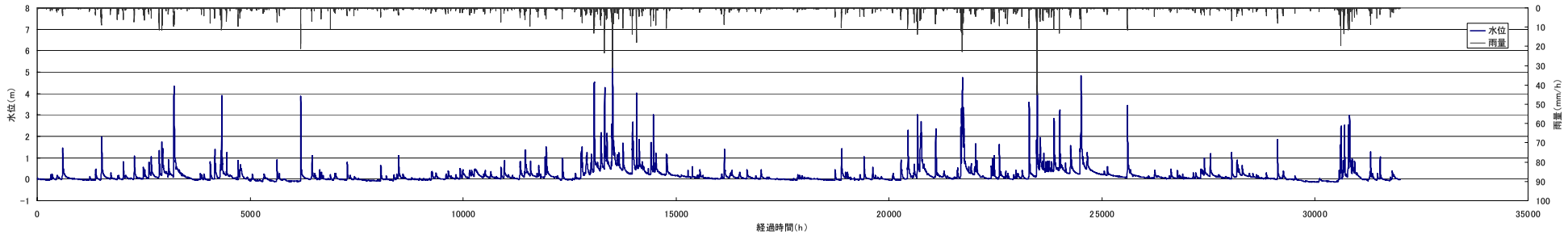


学習データ

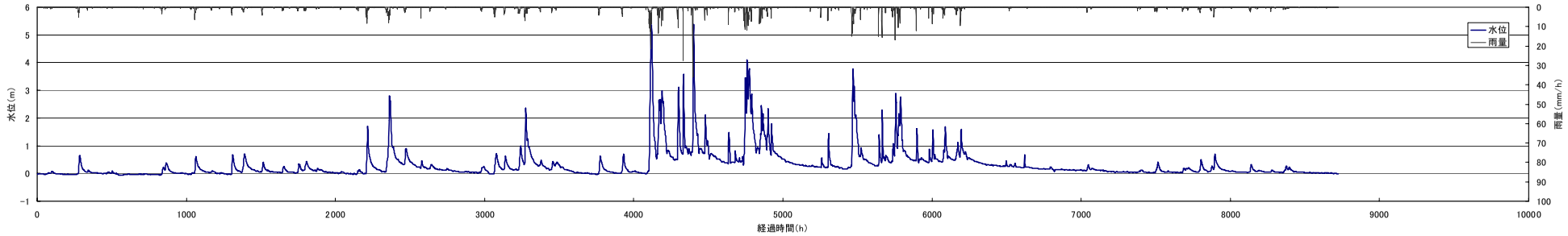


未知データ

勘六橋地点

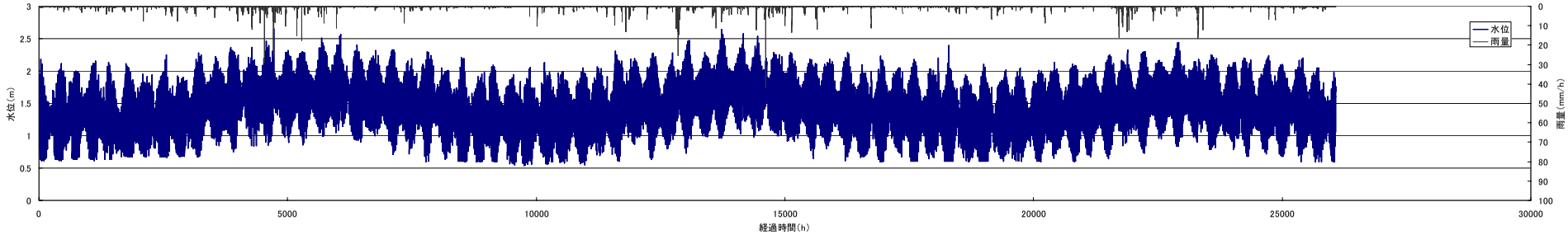


学習データ

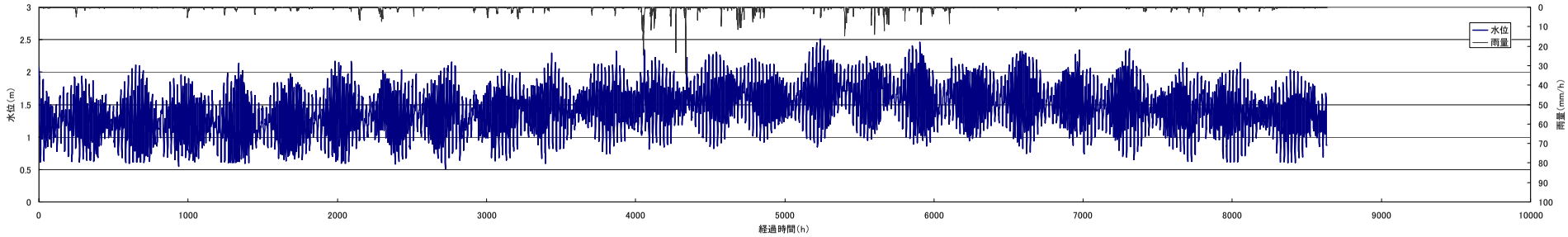


未知データ

祇園橋地点

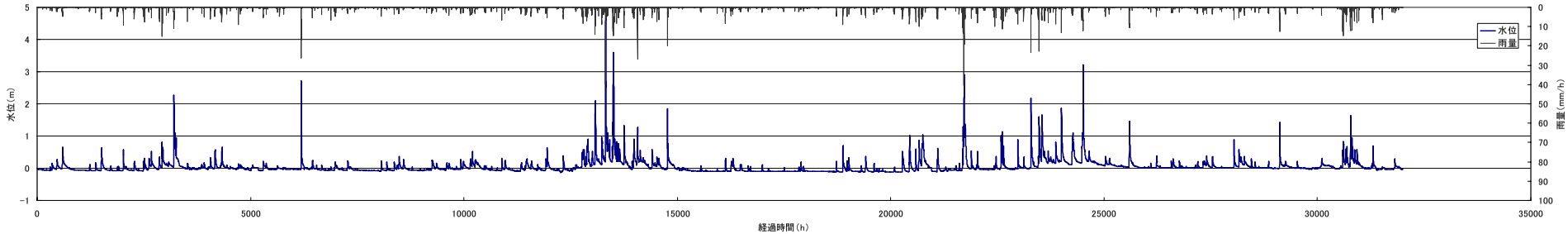


学習データ

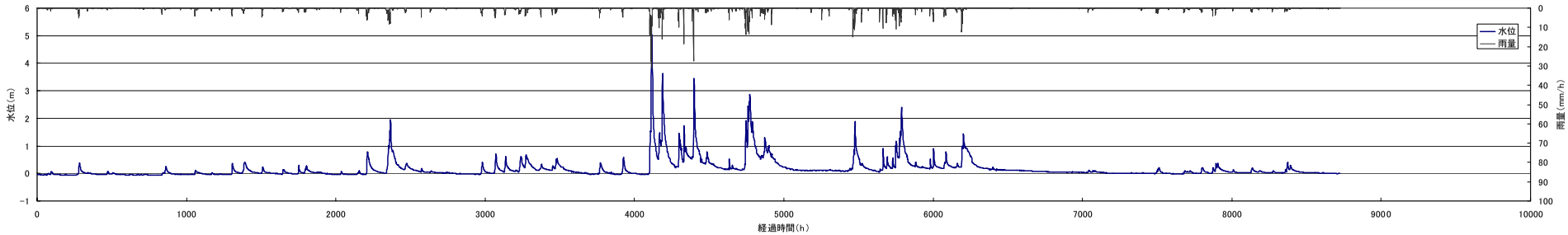


未知データ

宮田橋地点

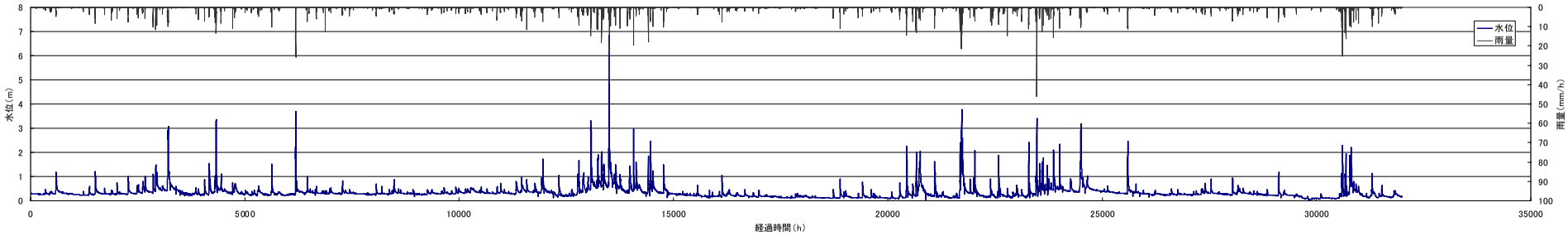


学習データ

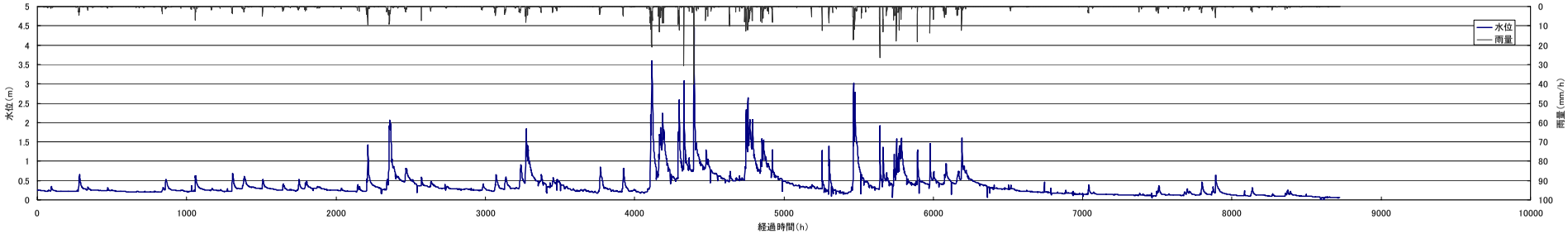


未知データ

秋松橋地点

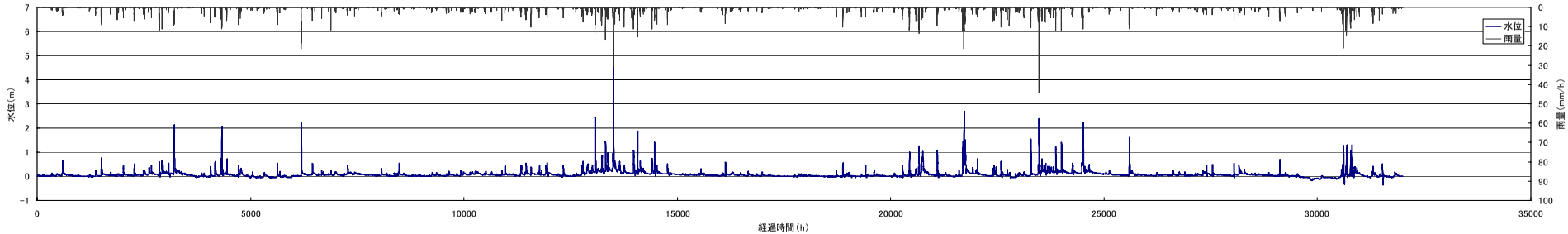


学習データ

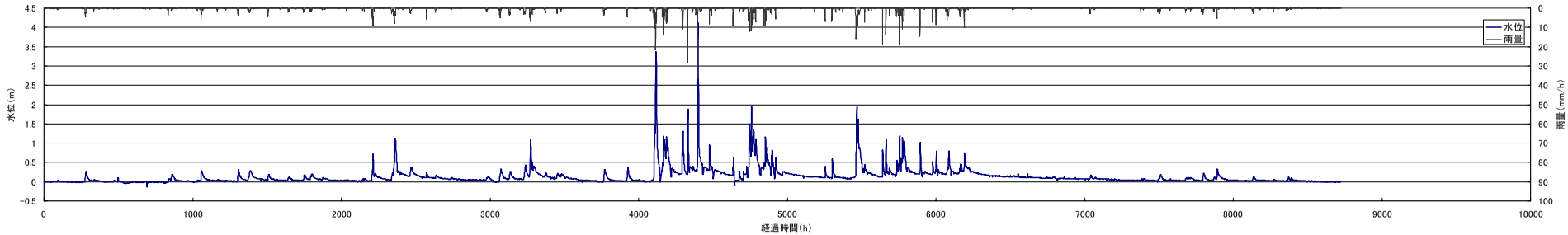


未知データ

川島地点

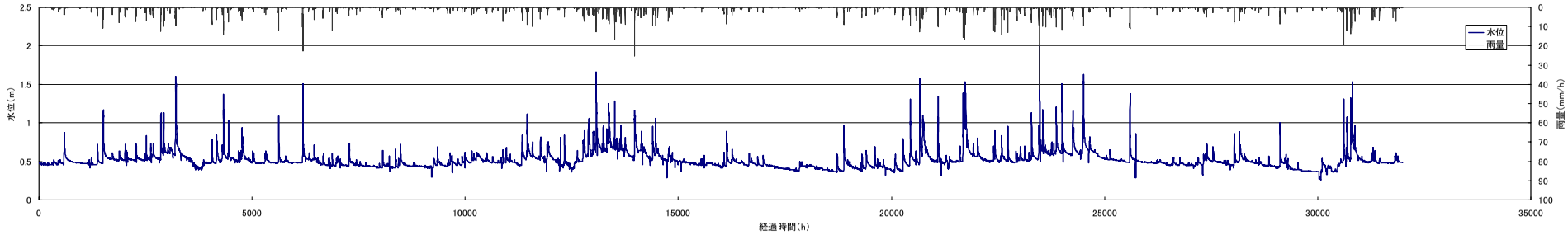


学習データ

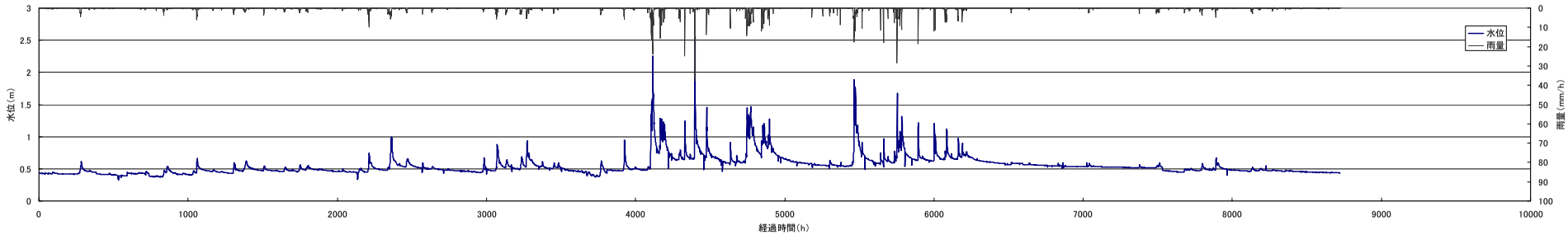


未知データ

大隈地点

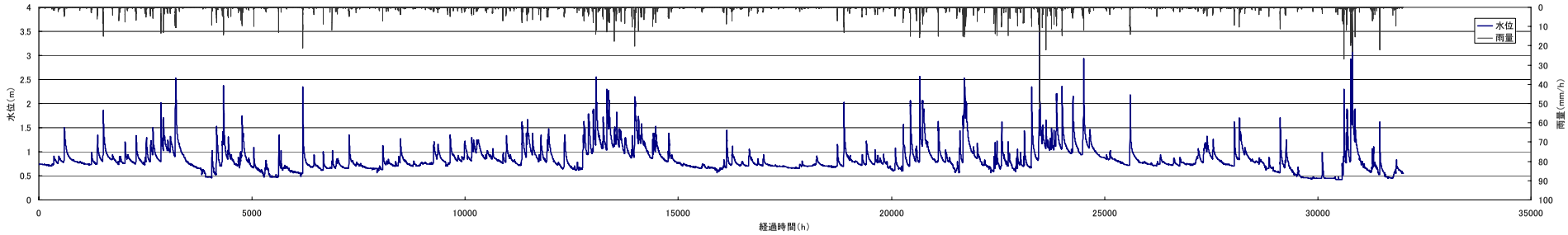


学習データ

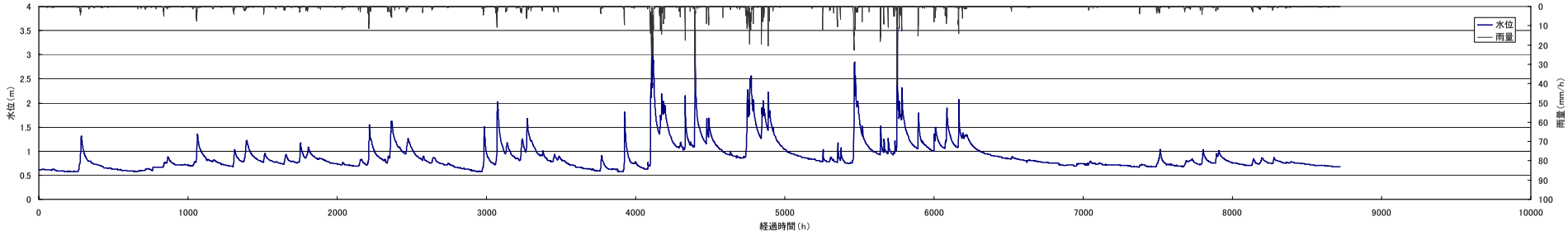


未知データ

添田

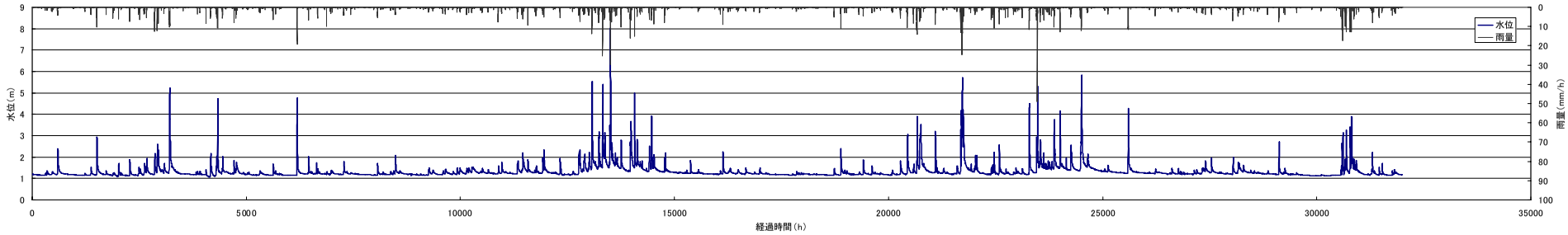


学習データ

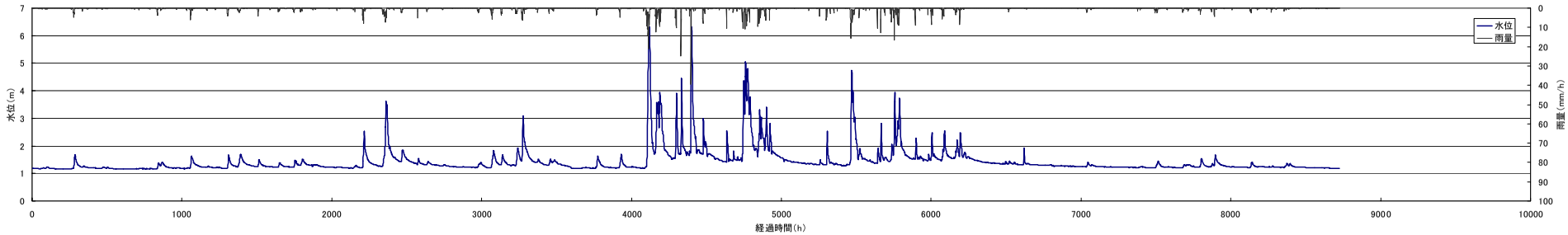


未知データ

日の出橋水位地点

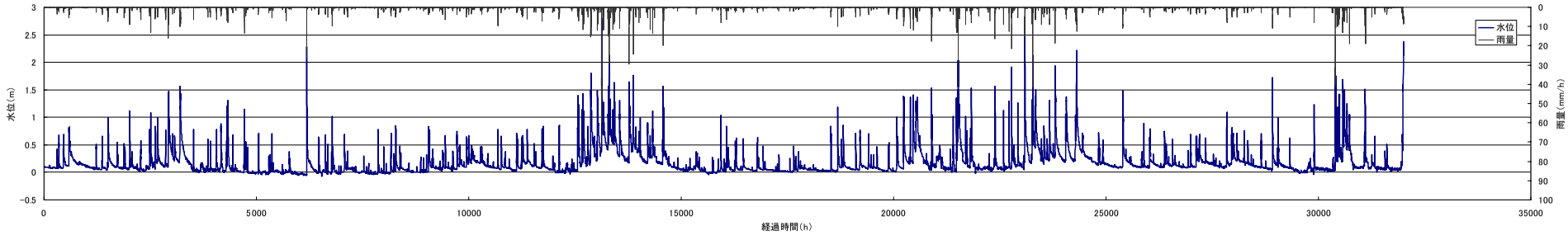


学習データ

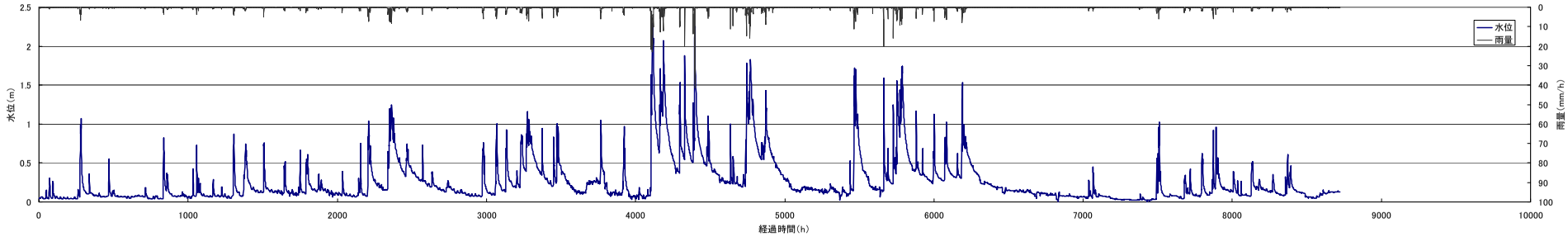


未知データ

野面地点



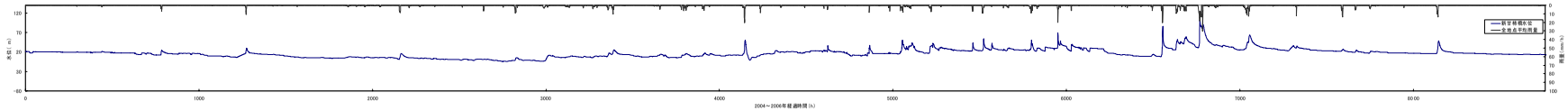
学習データ



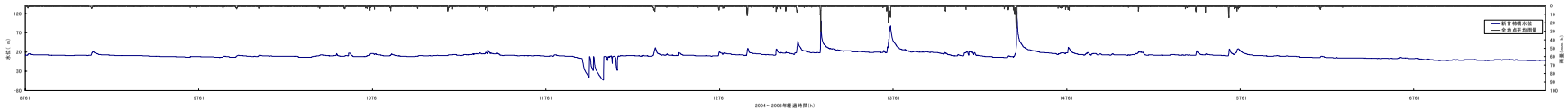
未知データ

酒匂川データ

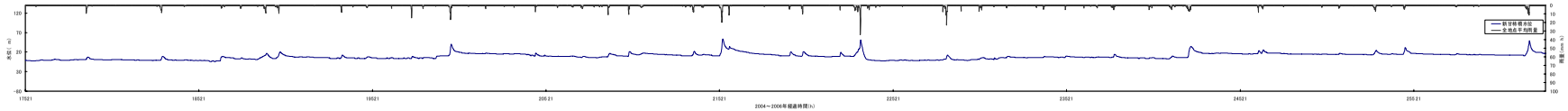
新甘柿橋地点



2004 年（学習データ）

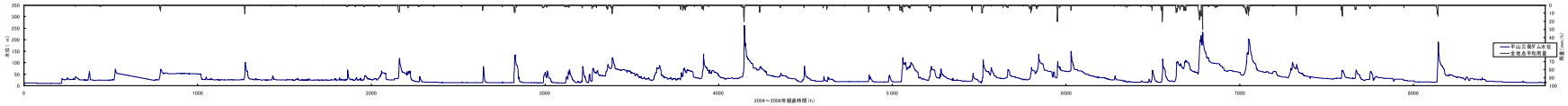


2005 年（学習データ）

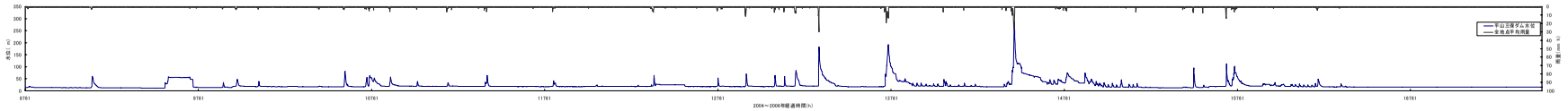


2006 年（未知データ）

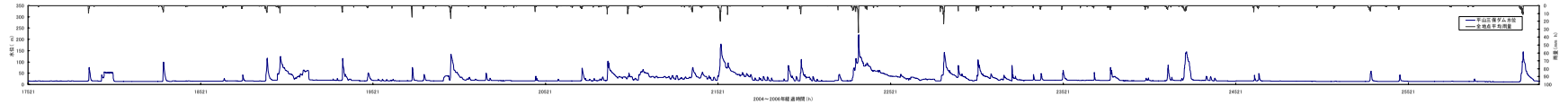
平山三保ダム地点



2004 年（学習データ）

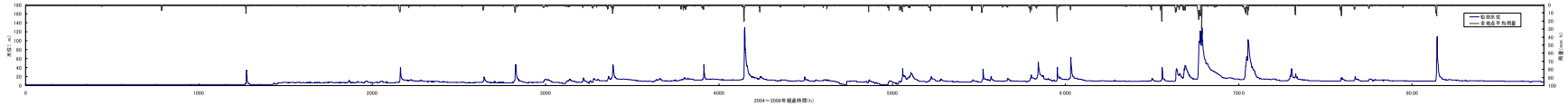


2005 年（学習データ）

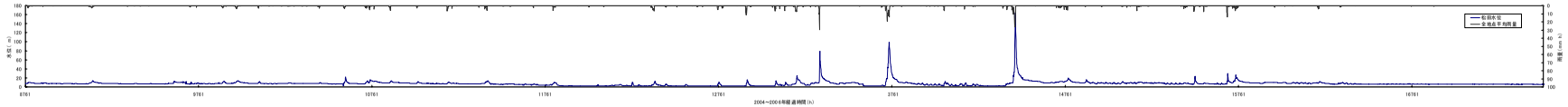


2006 年（未知データ）

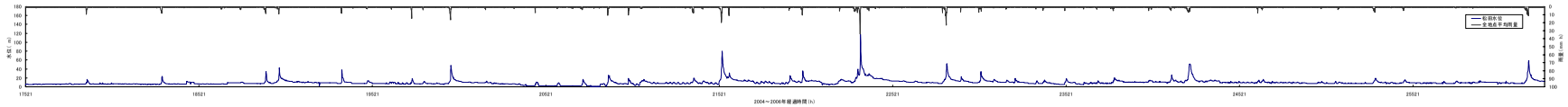
松田地点



2004 年（学習データ）



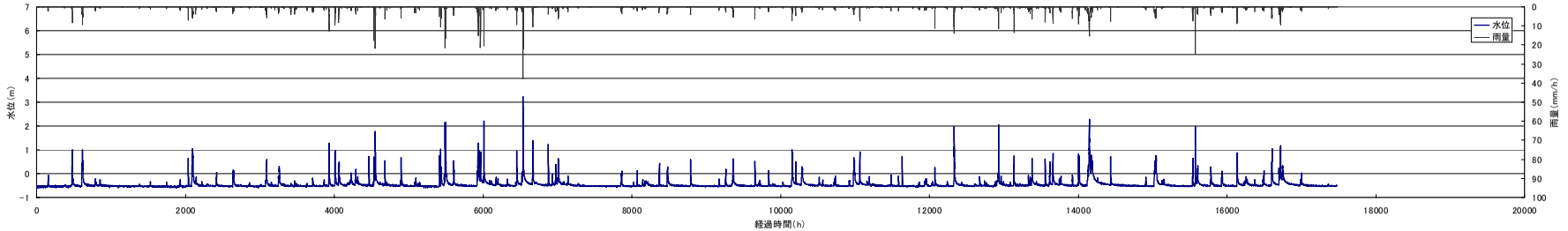
2005 年（学習データ）



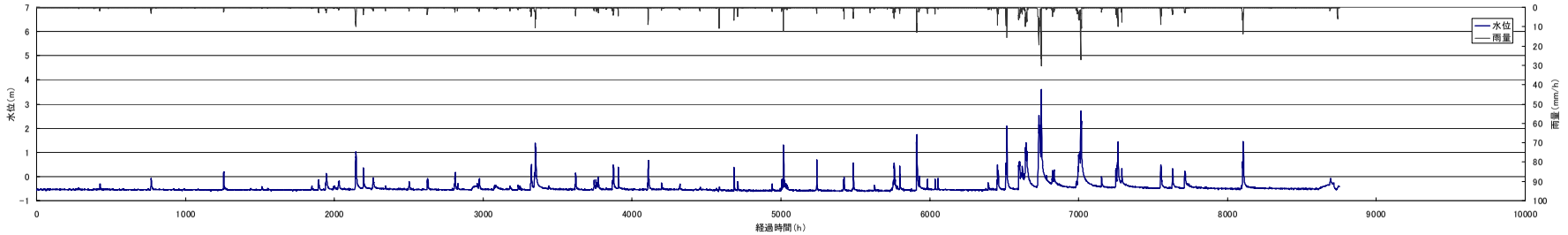
2006 年（未知データ）

鶴見川データ

寺家橋地点

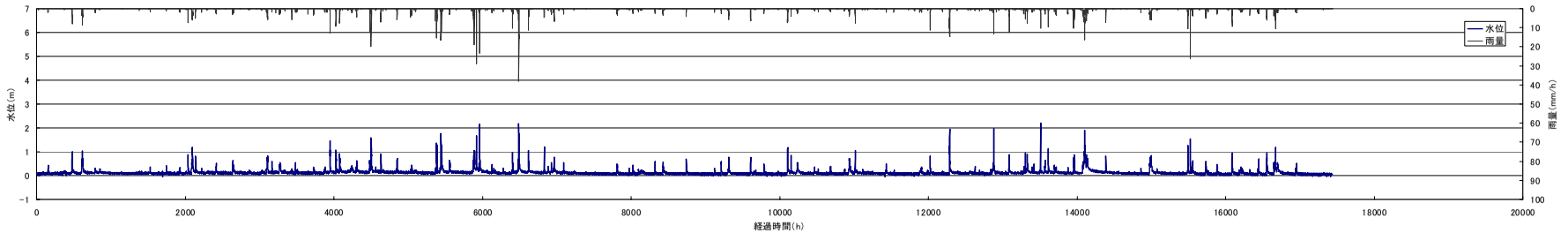


学習データ

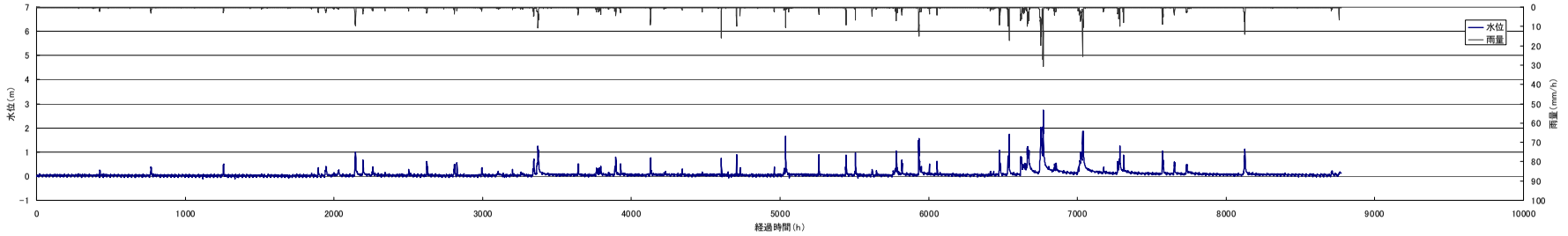


未知データ

浅山橋

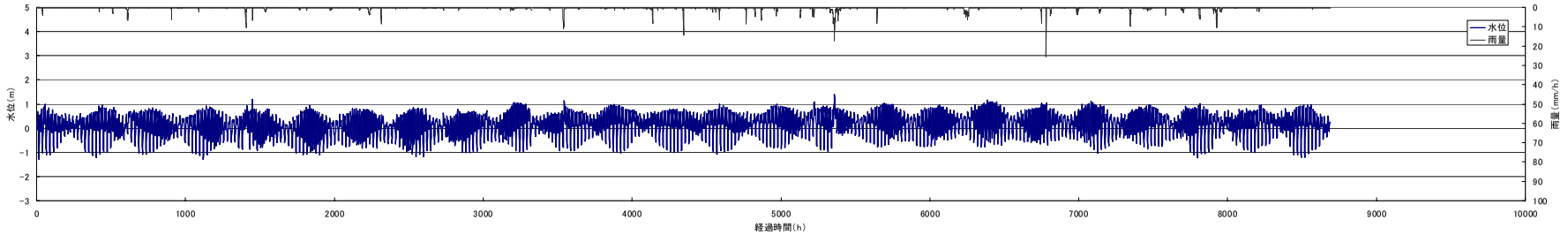


学習データ

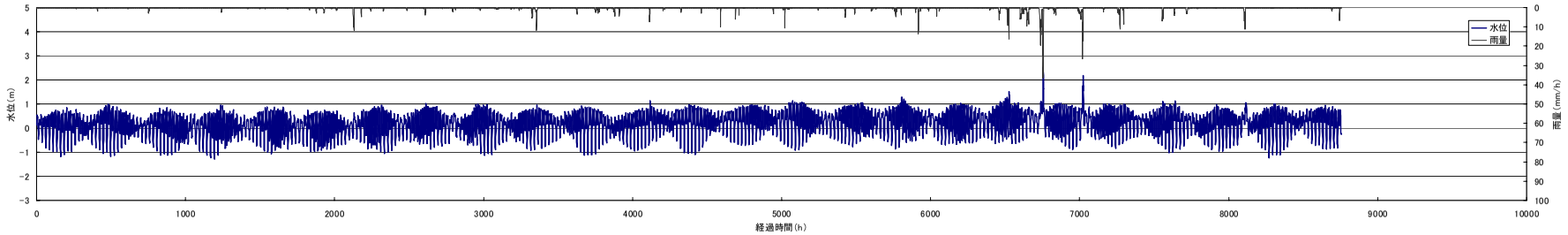


未知データ

末吉橋

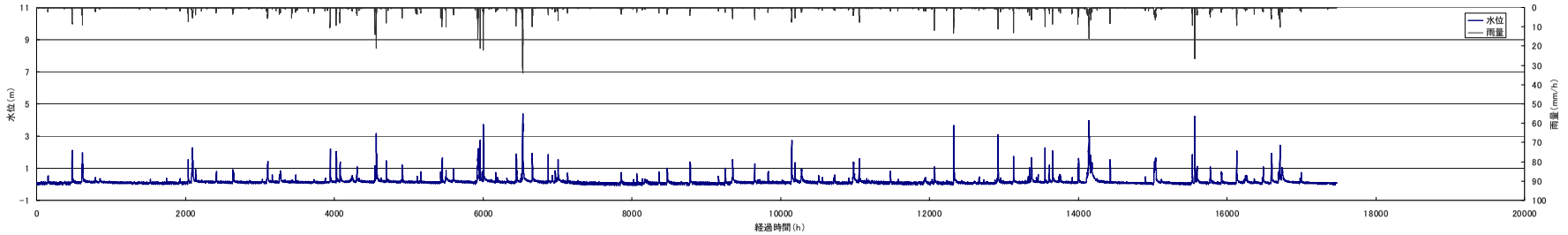


学習データ

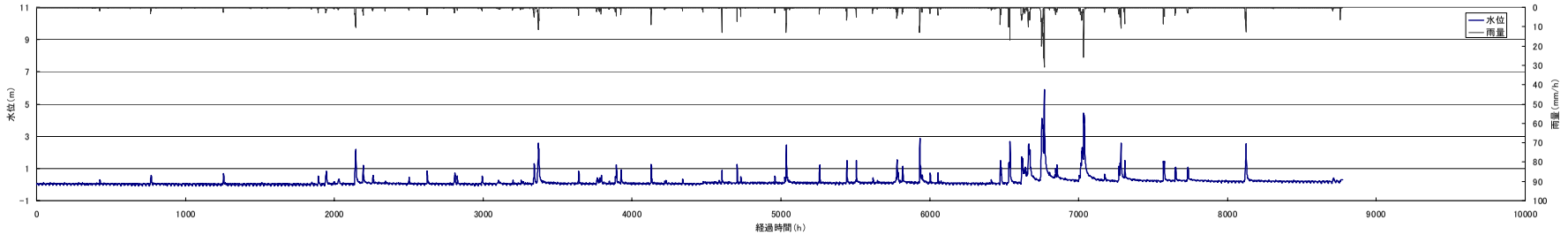


未知データ

落合橋



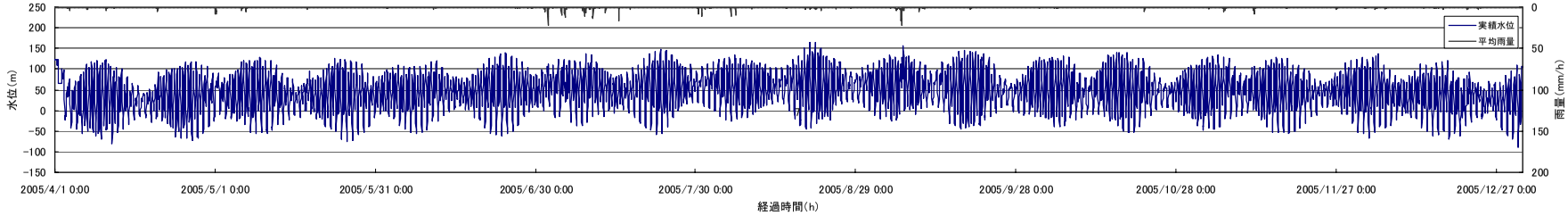
学習データ



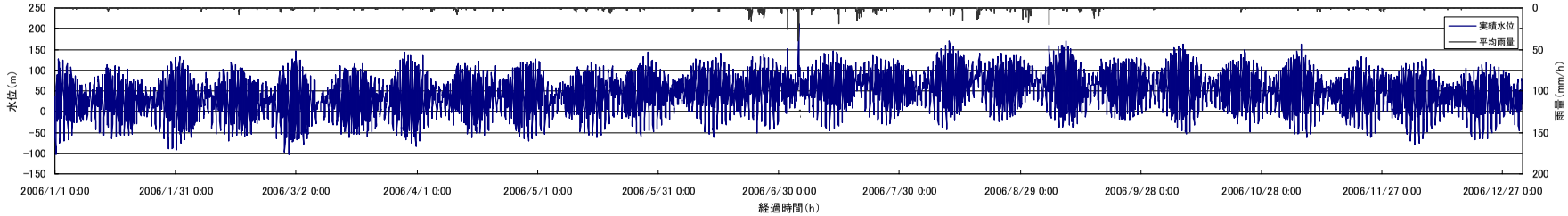
未知データ

御笠川データ

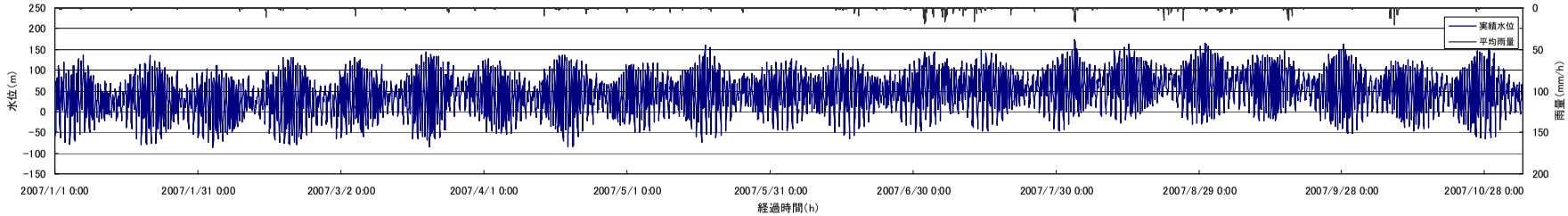
山王橋地点



2005 年



2006 年



2007 年

巻末資料（その２）

「人工知能技術を活用した洪水予測手法の開発」共同研究成果（平成18～19年度）

独立行政法人　土木研究所　水災害・リスクマネジメント国際センター
JFEエンジニアリング　株式会社

1

背景と研究目的

- 近年、局所的な集中豪雨等により、中小河川における水害が相次いでいる。これらの水害を軽減するための現実的な対策として、洪水予測情報を活用した水防・避難警戒態勢を確立することが必要であると考える。
- しかしながら、従来の貯留関数法やタンクモデル法を用いた予測モデルは、パラメータの同定・構築において膨大な水文資料を用いての試行錯誤を含む高度な解析が必要であり、水文資料が十分ではない中小河川においては適用が困難であるとともに、パラメータ解析は高コスト化の１つの要因となっている。
- これらの背景を踏まえ、本研究では様々なリアルタイム水文観測値と、ある地点における洪水流出量（もしくは水位）との関係を人工知能技術により簡便かつ自動的に探索・決定することで、従来よりも少ないコストと労力で洪水予測モデルを構築する手法を開発することを目的とする。

2

人工知能技術を活用した洪水予測手法の開発

大河川

・流域内テレメータ雨量が充分配置
・水位・流量データあり
・長期間にわたる水文データを蓄積

オーダーメイドで貯留関数法等とフィードバックシステムを基礎とした洪水予測システムの整備が可能

中小河川

・流域内にテレメータ雨量が不足
・水位データがあっても流量データがないケースがある

ゲリラ的かつ局所的に発生する中小河川洪水に対し、大河川と同じような水位予測システム整備を行うのは困難

・レーダ雨量計データの活用
（雨量分布の面的把握）
・水位を直接予測

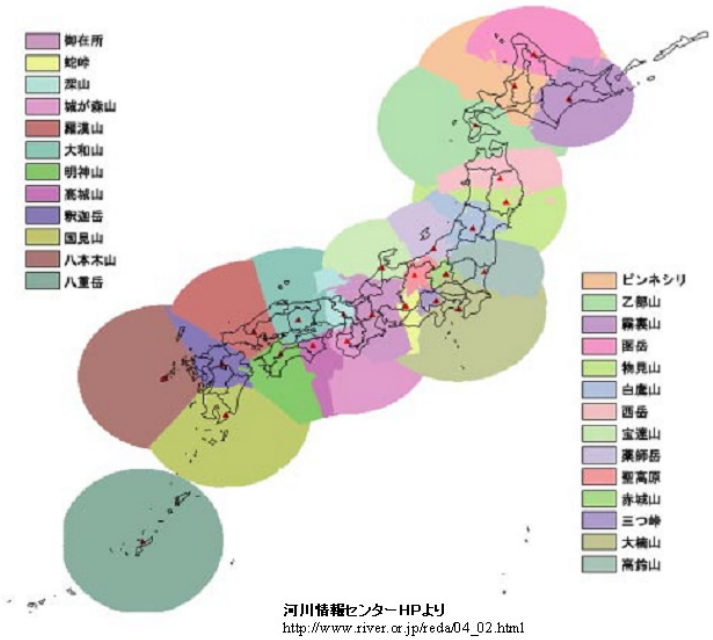
高速・高精度な人工知能技術を活用して、専門的知識・経験がなくても効率的に低コストで水位予測システムを整備

レーダ雨量計データの活用を検討し、面的な雨量分布を把握することにより局所的な集中豪雨にも対応

新たな洪水予測手法を取り入れる事により、多くの中小河川に於いて、洪水予測システムの迅速な整備と実施が可能となる

3

レーダサイトマップ



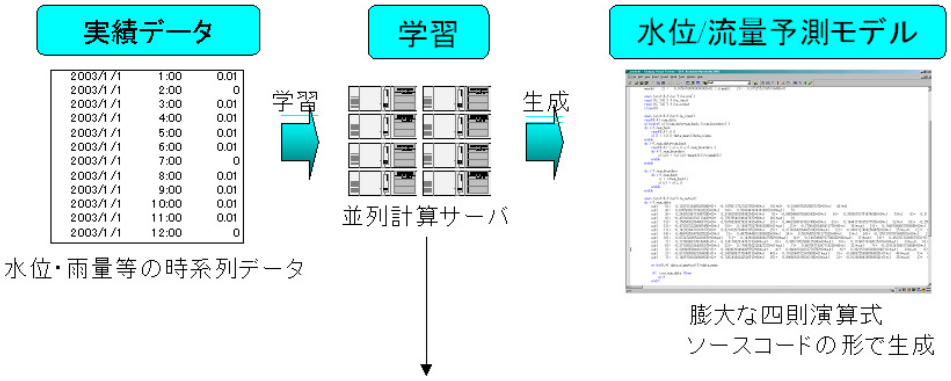
河川情報センターHPより
http://www.river.or.jp/reda/04_02.html

- 約1km×1kmのメッシュデータをリアルタイムで配信
- 地上雨量計が設置されていない箇所でもレーダ雨量データは入手可能
- 雨量分布を面的に把握できるため、局所的な降雨も観測可能

4

水位/流量予測モデルの生成方法

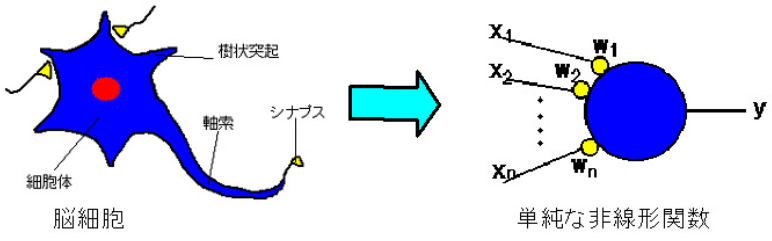
■ 人工知能エンジン（WinmuSe®）により実績データを学習し、
水位/流量予測モデルを自動生成。

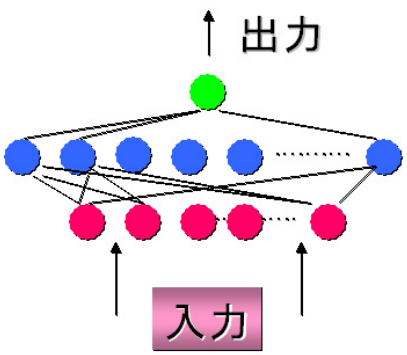


遺伝的プログラミングとGMDHを応用した独自の人工知能エンジン

5

脳細胞/遺伝子を模擬したモデル





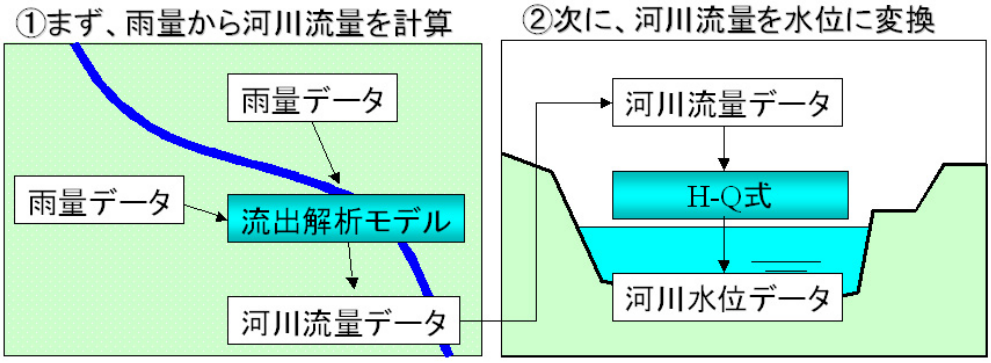
高性能な「脳」は、単純な脳細胞の組み
合わせにより成り立っていることに着目。

脳細胞のつながり方を記述する「遺伝子」
の並びを最適化（遺伝的プログラミング=GP）して
高性能な「脳」＝数式を作り出す。

独自のデータハンドリング技術
により数千にも及ぶ膨大な入力データを
高速に処理することが可能。

6

洪水予測手法の比較（一般的な流出解析モデル）

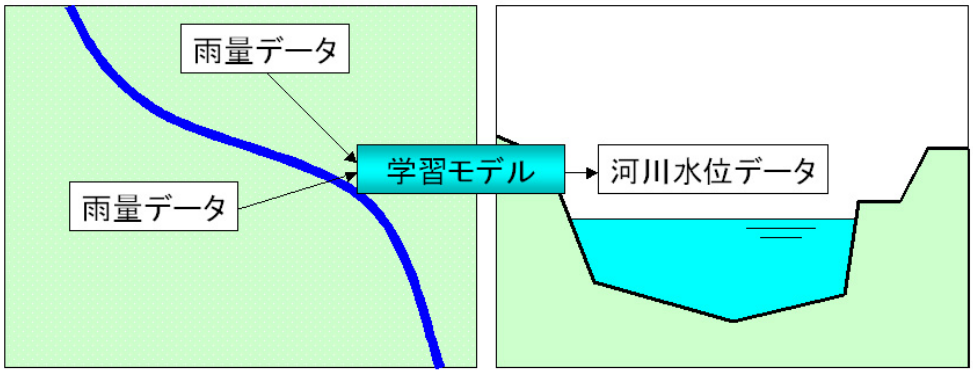


・河川水位に影響する諸要素の因果関係を定量的に把握した上での予測が可能となる。
・高精度な流量観測や詳細な現地調査が必要。
・様々な出水に合致したモデルパラメータの決定に膨大な手間がかかる。
・H-Q推定の誤差が予測水位に影響する。
・ダム、潮位等の影響要素が増えるとモデル構築に手間がかかる。

☆諸要素の影響関係を把握すべき河川計画や、それらの影響を考慮した総合的な管理が求められる大河川のリアルタイム予測に向いている。

洪水予測手法の比較（人工知能生成モデル）

■ 様々な水文データ（レーダ雨量等）を入力し、直接水位を計算。



・流量観測や現地調査が不要。
・低水から高水までの実績データに合致したモデルを構築。
・H-Q推定を行うことなく直接水位を予測可能。
・様々な水文データ（レーダメッシュ雨量やダム放流量等）を入力可能。

8

☆中小河川におけるリアルタイムの予測システムに適している。

研究内容

検証サイト

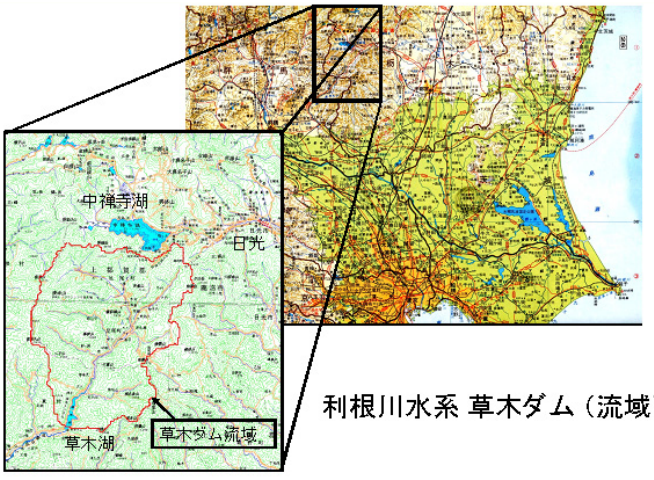
- 利根川水系草木ダム流入量予測（群馬県）
- 佐波川水位予測（山口県）
- 遠賀川水位予測（福岡県）
- 鶴見川水位予測（神奈川県）
- 酒匂川水位予測（静岡県/神奈川県）
- 御笠川水位予測（福岡県）

検証項目

- 異なる流域（中小、都市河川、感潮域等）での検証
- レーダー雨量を用いての検証
- 最適なデータ入力方法の検討
- 超過洪水の検証
- 予報雨量誤差の影響評価

9

草木ダム流入量予測



利根川水系 草木ダム（流域面積254km^2）

1983~1998年の
20出水データを学習
（流入量/流域平均雨量）

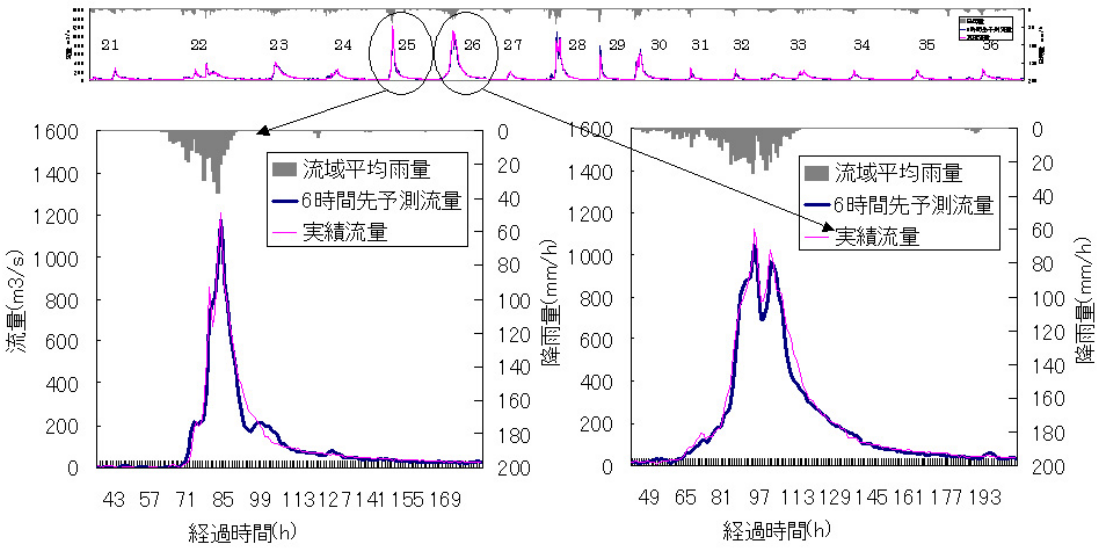
ダム流入量
予測シミュレータを生成

1998~2005年の
16出水を予測

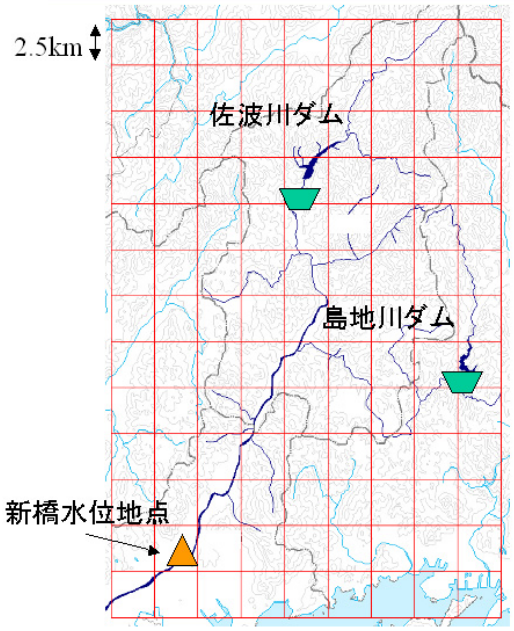
草木ダム流入量予測結果

	ピーク誤差(m^3/s)
学習トレース(20ケース)	69.6
未知データ予測(16ケース)	87.6

※6時間先予測のRMSE。



佐波川水位予測



佐波川(流域面積423km^2)

2004~2005年のデータを学習
(水位/レーダ雨量/ダム放流量)

↓

ダム下流域の
水位予測シミュレータを生成

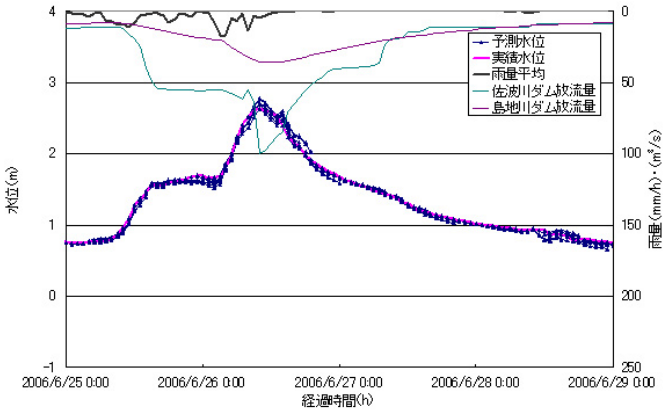
↓

2006年のデータで水位予測

佐波川水位予測結果

	平均雨量モデル 誤差(m)	メッシュ雨量モデル 誤差(m)
学習トレース	0.0016	0.0021
未知データ予測	0.0018	0.0020

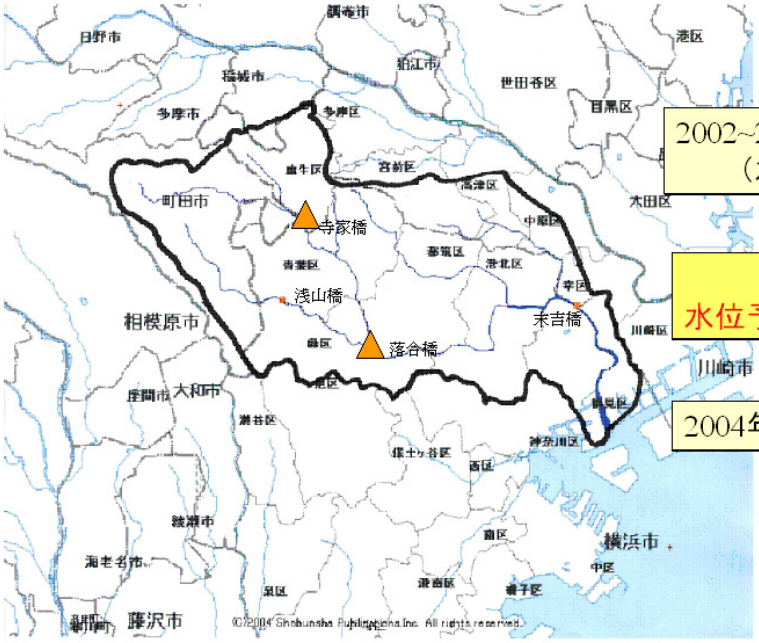
※新橋水位地点の結果。
※6時間先予測のRMSE。



新橋地点水位(423.1km²)

⇒ダムを含む河川流域において水位を予測できることを確認。

鶴見川水位予測



2002~2003年のデータを学習
(水位/レーダ雨量)

都市型河川の
水位予測シミュレータを生成

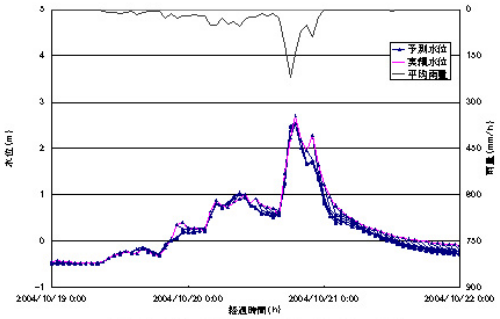
2004年のデータで水位予測

鶴見川(流域面積235km²)

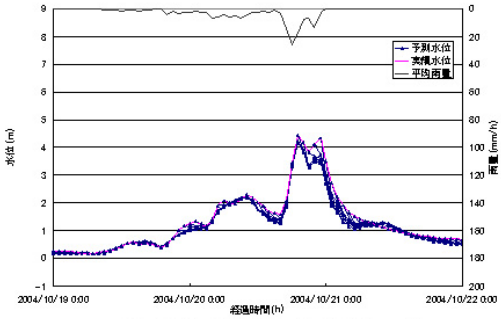
鶴見川水位予測結果

	平均雨量モデル 誤差(m)	メッシュ雨量モデル 誤差(m)
学習トレース	0.0062	0.0081
未知データ予測	0.0088	0.0179

※落合橋水位地点の結果。
※6時間先予測のRMSE。



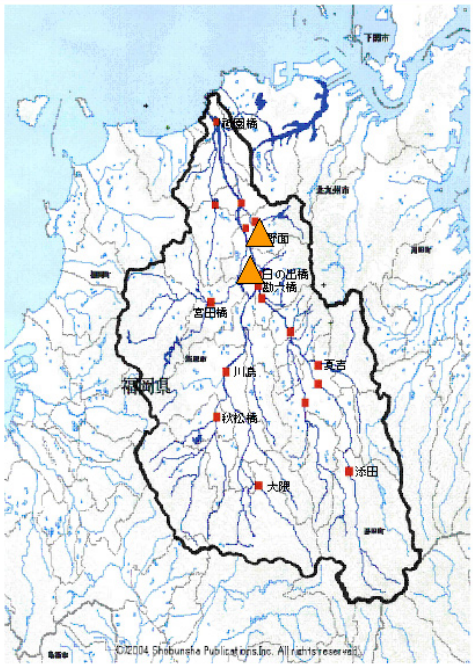
寺家橋水位地点(26km²)



落合橋水位地点(112km²)

⇒都市型河川において水位を予測できることを確認。

遠賀川水位予測



遠賀川(流域面積1026km²)

2002~2005年のデータを学習
(水位/レーダ雨量)

↓

様々な流域スケールの
水位予測シミュレータを生成

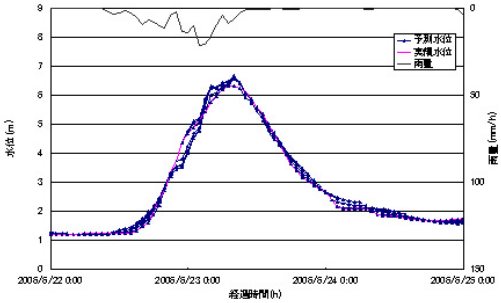
↓

2006年のデータで水位予測

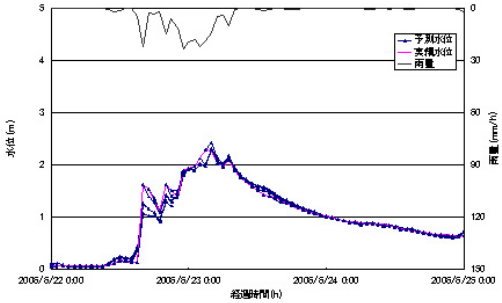
遠賀川水位予測結果

	平均雨量モデル 誤差(m)	メッシュ雨量モデル 誤差(m)
学習トレース	0.0082	0.0129
未知データ予測	0.0087	0.0146

※日の出橋地点の結果。
※6時間先の予測誤差を評価。



日の出橋水位地点(686.8km^2)



野面水位地点(8.1km^2)

⇒様々な流域スケールで水位を予測できることを確認。

御笠川水位予測



御笠川(二級河川、流域面積94km^2)

2005~2006年のデータを学習
(水位/レーダ雨量/気圧/風向/風速/天文潮位)

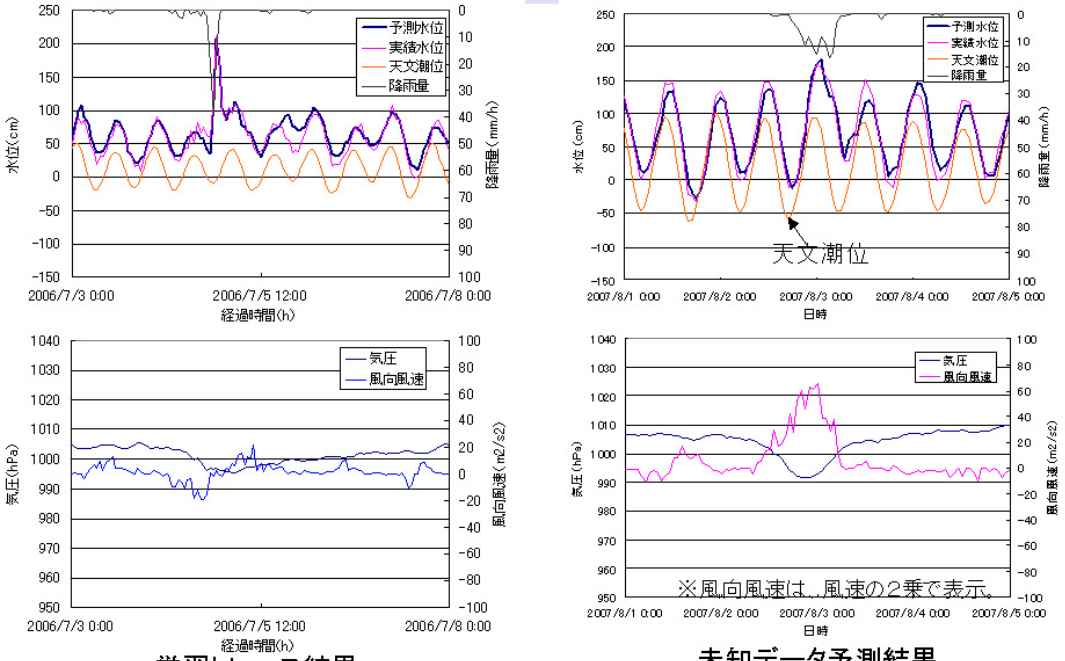
↓

感潮河川の
水位予測シミュレータを生成

↓

2007年のデータで水位予測

御笠川水位予測結果



学習トレース結果　　未知データ予測結果

山王橋水位地点（86.7km^2）の事例

酒匂川水位予測



2004~2005年のデータを学習
（水位/レーダ雨量）

↓

ダム下流域の
水位予測シミュレータを生成

↓

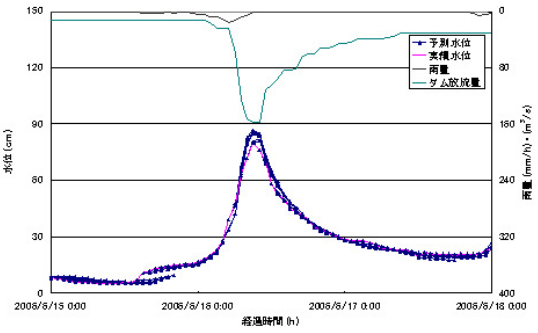
2006年のデータで水位予測

酒匂川（流域面積582km^2）

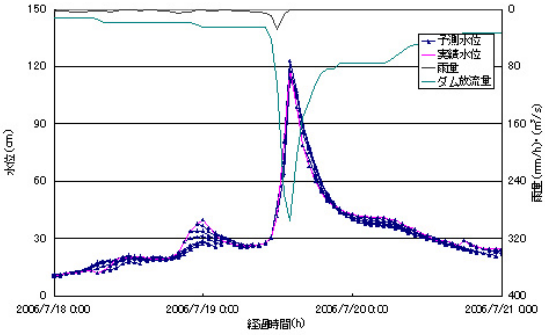
酒匂川水位予測結果

	平均雨量モデル 誤差(cm)	メッシュ雨量モデル 誤差(cm)
学習トレース	2.43	8.49
未知データ予測	2.35	13.63

※松田水位地点の結果。
※6時間先の予測誤差を評価。



松田水位地点(356.6km²)



松田水位地点(356.6km²)

⇒ダム下流域において水位を予測できることを確認。

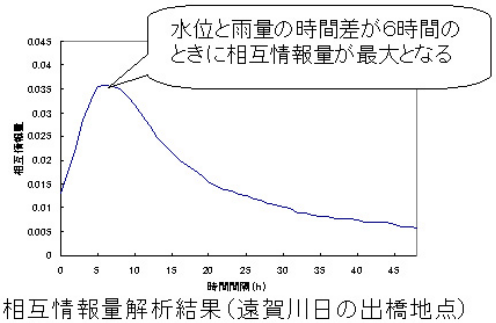
降雨量の過去参照時間の検討

水位予測モデル: $H(t) = f(H(t-1),\ldots, R(t+1),\ldots)$

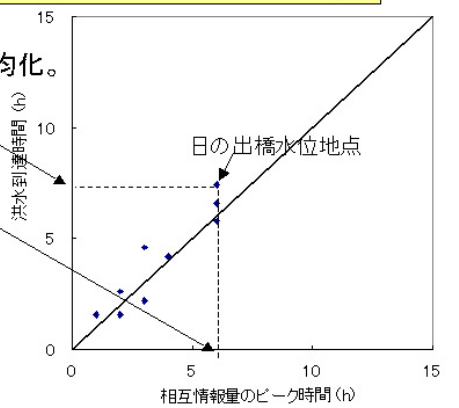
降雨量の過去参照時間の決定方法は？

①洪水到達時間(水文学的アプローチ)
主要10出水の雨量と水位のピーク時間差を2倍し平均化。
ただし人的判断を伴い手間がかかる。

②相互情報量解析(情報工学的アプローチ)
水位と雨量の相互情報量が最大となる時間差。
人的判断を伴わず客観的に決定可能。



相互情報量解析結果(遠賀川日の出橋地点)



過去参照時間の比較(遠賀川9水位地点分)

両手法の結果はよく対応しており、人的判断を伴わずに過去参照時間を決定可能な相互情報量解析の手法が有効と考えられる。

メッシュ雨量の入力最適化

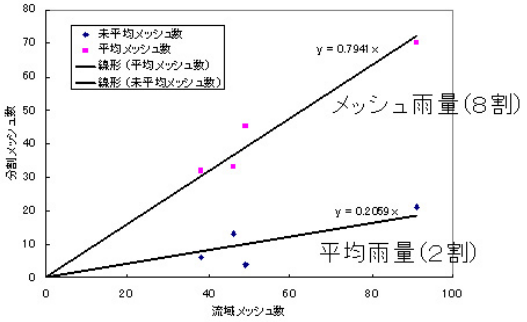
平均雨量モデル
雨量分布の情報が欠落するが、多様なデータが不足している場合においても平均雨量と水位の関係を同定することが可能。

メッシュ雨量モデル
雨量分布の情報を扱えるが、全てのメッシュ雨量と対象水位の因果関係を同定するには多くのデータが必要。

平均・メッシュ雨量混合モデルを提案

水位観測所近傍⇒メッシュ雨量を入力
水位観測所から離れた領域⇒平均雨量を入力

いずれの流域スケールにおいても、
2割をメッシュ、8割を平均雨量とした場合に最も予測精度が高くなった。



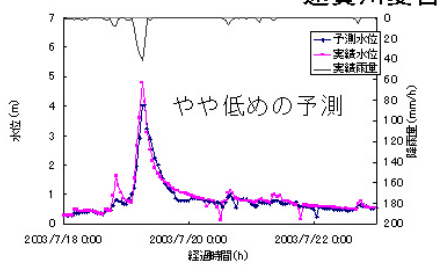
元の流域メッシュ数に対する最適配分メッシュ数

23

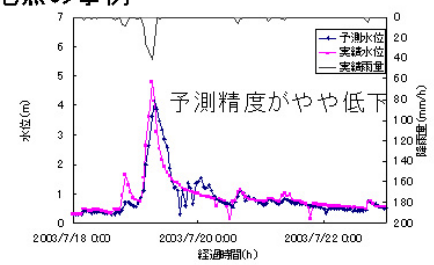
超過洪水時の予測精度検証

未曾有の出水に対する予測精度を検証するため、
最大ピークの出水を学習データから除外し、
仮想的に超過洪水と見なして予測検証を実施した。

遠賀川夏吉水位地点の事例



平均雨量モデル（超過洪水を仮定）

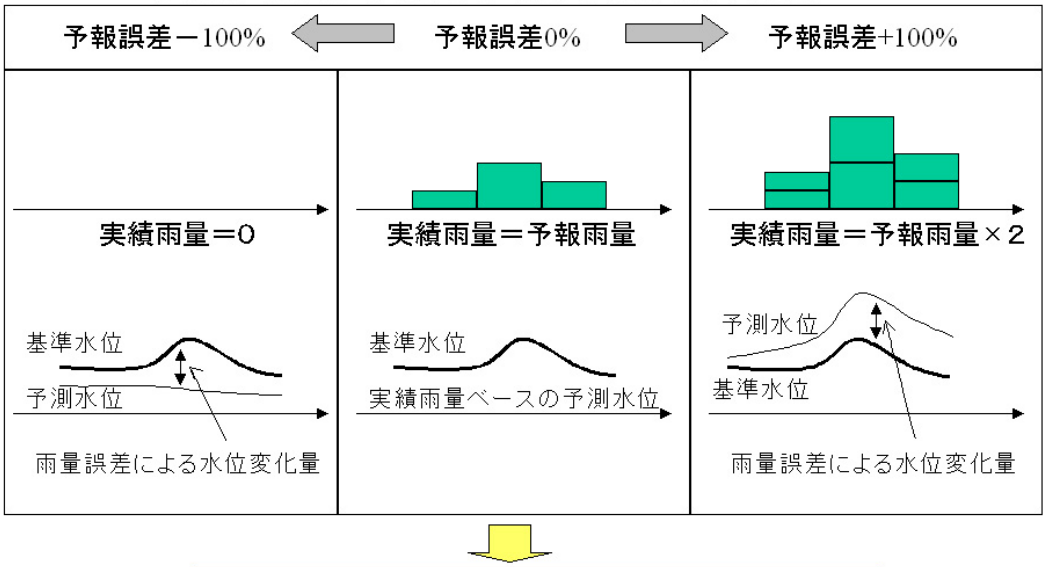


メッシュ雨量モデル（超過洪水を仮定）

・超過洪水時に、やや低めの予測となるケースが多いことを確認。
・平均雨量を用いたモデルの方が予測安定性が高いことを確認。
・最大出水のデータを学習することにより、相当規模の出水に対する予測精度を確保できることを確認。

予報雨量誤差の影響評価（1）

実績雨量に対して仮想的な予報雨量誤差を想定し、
予報雨量誤差が予測水位に及ぼす影響を評価した。

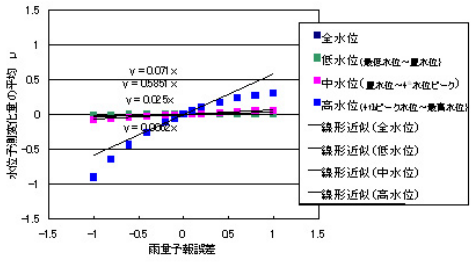


予報雨量誤差に対する水位変化量を統計的に分析

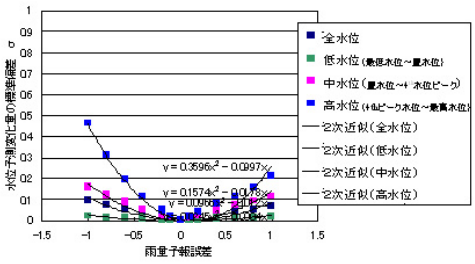
25

予報雨量誤差の影響評価（2）

遠賀川野面水位地点における、予報雨量誤差と予測水位変化量の関係



予報雨量誤差と水位変化量の平均値の関係
（3時間先）



予報雨量誤差と水位変化量の標準偏差の関係
（3時間先）

・予測水位変化量の平均値は、予報雨量誤差に対して比例の関係となる。
・予測水位変化量の標準偏差は、予報雨量誤差に対して二乗の関係となる。
・流域面積が小さいと1時間先の予測でも雨量誤差の影響を受けるが、流域面積が大きくなると数時間先の予測から雨量誤差の影響を受ける。

26

まとめ

①対象河川流域の予測モデル検討
・様々な特徴の河川流域（ダム、中小、都市河川、感潮域等）において、水位に影響するデータ（レーダ雨量、ダム放流量、潮位等）を適切に学習することにより、良好な精度のモデルを構築できることを確認した。

②最適なデータ入力方法の検討
・入力雨量の過去参照時間の決定方法として、相互情報量解析により推定される洪水到達時間分を採用する方法が、水文学の観点からも妥当であることを確認した。
・メッシュ雨量を適切な配分比（平均8割、メッシュ2割）で入力することにより、高精度なモデルを構築できることを確認した。

③超過洪水の検証
・超過洪水を想定した検証では、予測がやや低めとなるケースが確認されたが、相当規模の出水データを学習することにより予測精度を確保できることを確認した。

④予報雨量誤差の影響評価
・予報雨量誤差に対して予測水位変化量の平均値は比例関係となり、標準偏差は二乗関係となることを確認した。また、流域スケールが大きくなるほど雨量誤差の影響が予測後半に発生することを確認した。

共同研究報告書
COOPERATIVE RESEARCH REPORT of PWRI
No.390 March 2009

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課
〒305－8516 茨城県つくば市南原1－6 電話029－879－6754