

中小河川における各種洪水予測モデルの 適用性に関する研究

STUDY ON APPLICABILITY OF VARIOUS FLOOD FORECAST MODELS FOR SMALL-MEDIUM SIZED RIVERS

天野 卓三¹・三輪 準二²・水草 浩一³・金木 誠⁴

Takuzo AMANO, Junji MIWA, Koichi MIZUKUSA and Makoto KANEKI

¹正会員 中電技術コンサルタント株式会社 河川部 (〒734-8510 広島県広島市南区出汐2丁目3-30)

²正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 企画課 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

³正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 水害研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

⁴正会員 国土交通省中部地方整備局中部技術事務所 (〒461-0047 愛知県名古屋市東区大幸南1-1-15)

There are many problems to make up the flood forecast model for the small-medium sized rivers. Some of problems are short run-off time and insufficient hydrologic data.

In this study, various flood forecast models were made by combining different kinds of hydrologic data and flood forecast methods, and the applicability of flood forecast models were examined at the model river. Moreover, the applicability of the models by using various feedback methods and forecast rainfalls were examined.

As a result, the applicability of various feedback methods and the prediction of water level accuracy when the forecast rainfall was used could be shown. In addition, the issues of feedback methods for the small-medium sized river were clarified.

Key Words: *Small and medium-sized river, flood forecast model, hydrologic data maintenance, feedback method*

1. はじめに

近年、河川整備の着実な進捗により、かつてのような大河川の氾濫は減少しているものの、一方で、局所的な集中豪雨の頻度が増加する傾向にあり、中小河川(都道府県知事管理河川)からの外水氾濫による被害が頻繁に発生している。これに対して、行政(水防関係者)や住民は、出水規模を迅速に予測し、水防活動等、被害軽減のための的確な対応をとることが必要である。

このような状況の中、平成13年に水防法が改正され、都道府県知事が「流域面積が大きい河川で洪水により相当な損害を生ずる恐れのあるものとして指定した河川(洪水予報河川)」については、気象庁長官と共同して、洪水予警報の発令を行うことが義務付けられた。

しかし、中小河川の洪水予測(洪水予警報)に関しては、国土交通大臣管理区間(直轄区間)と比べて、洪水到達時間が短く、水文データが十分でない場合もあるため、洪水予測モデルの構築に課題を抱えている河川も少なくない。よって、中小河川の状況を踏まえ、洪水予測手法の調査・研究を行い、豪雨災害に対する危機管理体制を確立する必要がある。

上記に伴い、本研究では、モデル河川において水文

データと洪水予測手法の組合せにより各種洪水予測モデルを作成し、その適用性について検討を行った。また、各種フィードバック手法、予測雨量を用いた場合のモデルの適用性についても検討を行った。

2. 水文データと洪水予測手法の組合せ検討

本研究では、中小河川の水文データ整備状況ならびに洪水到達時間とリードタイムの関係を踏まえて、検討ケース(各種洪水予測モデル)を設定する必要がある。

以下に、中小河川において考慮すべき点を示す。

- ・実測流量データが十分でない河川が多いため、実測HQによる換算流量を用いない場合の検討を行う(不等流計算HQによる換算流量を用いた検討、水位-雨量相関での検討など)。
- ・相関法は、洪水到達時間が短い、予測地点上流域に水位観測所が存在しないなどを考慮し、水位-水位相関ではなく雨量-水位相関での検討を行う。
- ・局所的な豪雨に対応するため、面的な降雨強度が把握可能なレーダ雨量を用いた検討を行う。
- ・中小河川の流域規模を考慮して、合成合理式法による検討を行う。

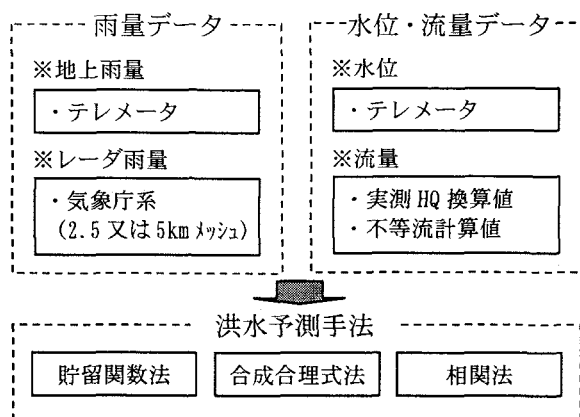


図-1 組合せに使用する各種要素

表-1 各種洪水予測モデル

No	流出解析手法	雨量	水位・流量
1	貯留関数法	地上テレメータ※1	実測HQ
2			不等流計算HQ
3		気象庁系レーダ※2	実測HQ
4			不等流計算HQ
5	合成合理式法	地上テレメータ	実測HQ
6			不等流計算HQ
7		気象庁系レーダ	実測HQ
8			不等流計算HQ
9	相関法	地上テレメータ	実測水位H
10		気象庁系レーダ	

※1：地上テレメータ雨量は国土交通省所管 10 観測所を使用。

※2：レーダ雨量は気象庁系レーダ雨量(5km メッシュ)を使用。

以上より、具体的ケースとして、図-1 に示す洪水予測手法と既存の水文データの組合せにより、貯留関数モデル、合成合理式モデルを各 4 ケース、相関モデルを 2 ケース、合計 10 ケースを設定した(表-1 参照)。

なお、数ケースの水文データ別洪水予測モデルを検証することにより、水文データ整備状況の異なる全都道府県の水防関係者に、各種洪水予測モデルならびにその精度を示すことが可能となる。

3. 各種洪水予測モデルの構築

(1) モデル河川と検討対象地点の設定

本研究では、前項で設定した各種洪水予測モデルが検討可能となるよう、各種水文データが整備されている一級河川松浦川水系をモデル河川として選定した。

また、検討地点については、流域規模ならびに地形の影響による各種洪水予測モデルの適用性を検証するため、モデル河川の水位・流量観測所(以降、流量観測所と記す)の中から、流域面積 30～300km² の 4 地点を洪水予測地点(検証地点)として選定した。図-2 に選定したモデル河川流域・検討地点位置図を示す。

(2) 洪水予測モデルの構築

現在、運用されている洪水予測モデルは、洪水予測地点上流域に流量観測所(図-2 を例にすれば、牟田部地点の場合、中島地点と川西橋地点が該当する)が存在する場合、上流域の流量観測所の実測値を用いて、

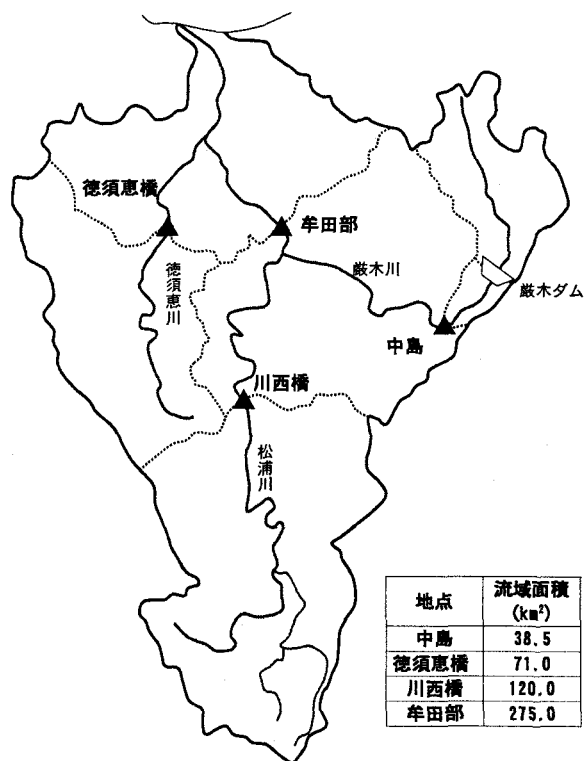


図-2 松浦川流域・検討対象地点位置図

残流域の洪水予測を行うのが一般的である。しかしながら、本研究の各地点洪水予測モデルは、流域規模に応じた予測値の精度分析を 1 つの目的としているため、上流域に流量観測所が存在しないものとして洪水予測モデルの構築を行った。つまり、上流域の流量観測所実測値を用いずに、4 地点ともそれぞれ個別に洪水予測モデルを構築した。

1) 貯留関数モデル

貯留関数法¹⁾は、流出現象の非線形特性を表すために降雨～流出の変換過程に「流域または河道貯留」の過程を導入し、これを媒介変数として、貯留量～流出量の関係を関係式で表し、貯留量の水収支を計算して、これから流出ハイドログラフを求めようとする計算法である。

モデル河川における貯留関数モデル検討条件を表-2 に示す。また、貯留関数流出モデル図を図-3 に示す。

なお、貯留関数モデルは厳木ダムの運用を考慮した。

2) 合成合理式モデル

合理式¹⁾は流域規模が小さく、つまり、洪水到達時間が短く、降雨損失が少ない流域によく適用される手法であり、基礎式はピーク流量と降雨強度の関係から表される。基本的には流量観測値がなく、上流に洪水調節施設が存在しない河川、流域面積 50km² 未満程度が適用の目安とされている²⁾。

$$Q = \frac{1}{3.6} f R A \quad (\text{式 } 1)$$

ここに、 Q ：ピーク流量， f ：ピーク流出係数

R ：降雨強度， A ：流域面積

表-2 貯留関数モデル検討条件

No ^{※1}	流域・河道分割 ^{※2}	雨量観測所	定数解析
1～2	12流域4河道	10観測所	5洪水(H10～12)
3～4	12流域4河道	5kmメッシュ	5洪水(H10～12)

※1 表-1 に示した検討ケース番号を表す。

※2 図-3 に示す貯留関数流出モデル図参照。

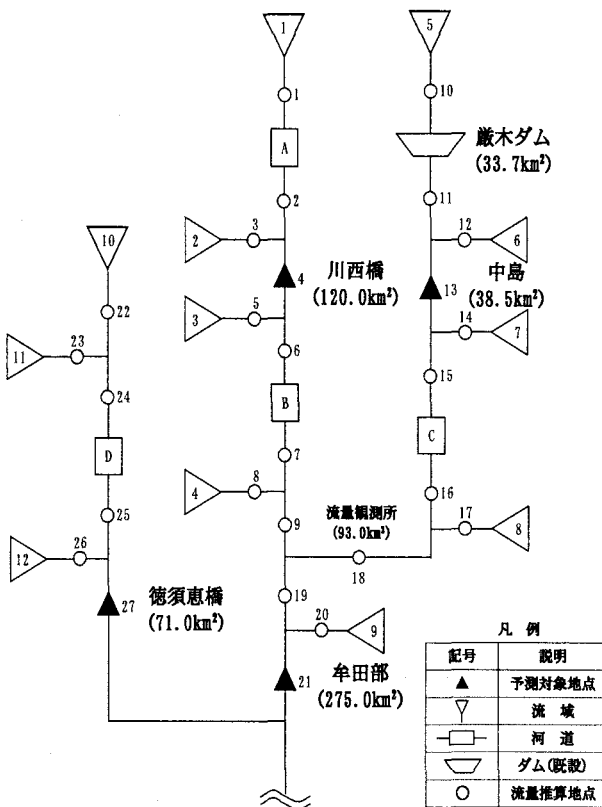


図-3 貯留関数流出モデル図

本研究では、流出波形が合理式による単位図を合成することにより得られる合成合理式法を用い、4 地点の流域別に単独モデルを構築した。なお、厳木ダムの影響は考慮しないものとした。

また、モデル河川における合成合理式モデル検討においては、雨量観測所は貯留関数モデルと同様とし、流出係数は、土地利用毎の標準的な流出率を土地利用面積に応じた加重平均で算出した。さらに、洪水到達時間は、クラークヘン式、土研式、角屋式、実績値の検討から、4 手法の平均値を採用した。

3) 相関モデル

相関モデル(流域平均雨量～水位相関)は、流域平均雨量、洪水予測地点のピーク水位及び洪水到達時間との相関関係を求め、その関係から水位予測を行うものである。

本研究では、既往の雨量データと水位データを用いて、予測地点時刻水位とその上流域 K 時間前 3 時間累加雨量との相関回帰式を作成した。その理由は、時刻水位と累加雨量又は時刻水位と時間雨量では、降雨パターン等により、相関関係が期待できないからである。なお、洪水到達時間 K については、ピーク水位と 3 時

表-3 洪水予測手法別水位誤差(unit: 水位 m)

流出解析手法	絶対誤差①	絶対誤差②	絶対誤差③
貯留関数法	0.46	0.52	0.93
合成合理式法	0.75	1.29	0.96
相関法	1.59	1.63	1.95

流出解析手法	絶対誤差④	絶対誤差⑤	最大誤差
貯留関数法	0.96	0.55	1.49
合成合理式法	0.78	0.92	2.27
相関法	2.00	1.36	4.47

※対象 4 地点における 2 洪水(H13 及び H14 洪水)の実績雨量(テレメータ、レーダ雨量)による計算水位と実績水位の誤差平均を示す。

※絶対誤差=|各時刻モデル計算水位-実績水位|

※最大誤差: 評価対象期間内で最大となる絶対誤差量。

※絶対誤差①(立上がり～低減部) ※絶対誤差②(立上がり～指定水位)

※絶対誤差③(指定水位～警戒水位)

※絶対誤差④(警戒水位～ピーク水位) ※絶対誤差⑤(低減部)

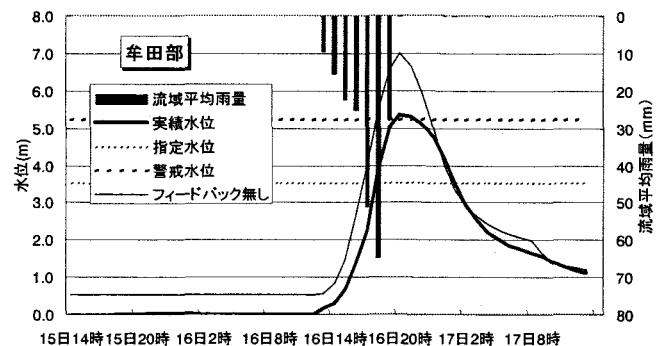


図-4 流出波形図

(H14. 9. 16/貯留関数法/テレメータ雨量/実測 HQ)

間累加ピーク雨量との時間差を考慮し、最も相関の高い時間差を洪水到達時間とするため、1～6 時間ずらしの検討を行った。しかし、相関に大きな差異は生じなかったため、リードタイムが概ね 3 時間であることから、式 2 の K を 3 時間と設定した。

$$H(n) = \alpha R(n - K) + \beta \quad (\text{式 2})$$

ここに、 $H(n)$: 予測地点 n 時水位、

$R(n - K)$: K 時間前 3 時間累加雨量

なお、雨量観測所、相関解析対象洪水については貯留関数モデルと同様とし、モデル作成時には、合成合理式モデルと同様に厳木ダムを考慮しないものとした。

(3) モデル適用性検討

構築した各種洪水予測モデルを用いて、モデル同定洪水とは異なる平成 13 年～14 年洪水(2 洪水)への適用性を検討した。適用性の評価は、絶対誤差、最大誤差による評価を行った。

表-3 に対象 2 洪水平均の洪水予測手法別水位誤差を示す。また、図-4 に牟田部地点における「貯留関数法/テレメータ雨量/実測 HQ」の流出波形図を示す。

表-3 より、洪水予測時に最も重要な絶対誤差③、④(指定水位～ピーク水位)で約 1m の誤差が生じている。つまり、モデル構築時に各種定数解析を行ったとしても、洪水予測時には降雨パターンが異なるため、モデルの精度は保証されないということである。

4. フィードバック手法の適用性検討

前述した洪水予測モデル構築の際には、既往洪水による実測雨量、実測水位・流量を用いての検討(定数解析等)を行った。しかし、平成13年～14年洪水での検証でも明らかのように、実際に洪水予測システムを運用し、洪水予報を行う場合、降雨のパターン等により、構築したモデルが必ずしも既往洪水に対する精度と同程度の精度を有するとは限らない。なぜなら、各種流出モデルは流出を表現する機構や入力情報に関して確定的に行われ、実時間レベルの予測において予測誤差の改善機能を有しないモデルであるためである。

このような場合、一般的に予測精度を向上させるため、実測値をもとに予測誤差を修正する方法が用いられる。そこで、各種フィードバック手法を用いて、平成13年～14年洪水(2洪水)におけるモデルの適用性を検討した。表-4に適用した手法の一覧表を示す。

(1) 貯留関数モデル

貯留関数モデルでは、以下に示す3種類のフィードバック手法を用いた場合の検討を行った。

1) 現時刻合わせ定数変動方式(流出率f補正)

本方式は、予測誤差を毎正時実測値が得られるたびに流出率fで修正し、予測値を接近させていく定数変動方式である(流域定数K,P固定)。なお、修正流出率で現時刻実測流量からその後の計算を行う。

2) 現時刻合わせ定数変動方式(貯留量S補正)

本方式は、上記手法と同様で、計算流量と実測流量との誤差が最小となる定数(貯留量S:流域定数K)を求め、その定数を用いて予測計算を行う方式である。なお、本方式においても、修正流域定数で現時刻実測流量からその後の計算を行う。

3) カルマンフィルター法

貯留関数モデル+カルマンフィルターによる予測誤差の推定モデルは、貯留関数法によって前時刻で予測された結果と、現時刻で入手した実測値の間の誤差を活用し、次時刻で生じるであろう予測誤差を確率的に推定(動的推定)して、予測精度を向上させようとするモデルである。

(2) 合成合理式モデル

合成合理式モデルでは、補正すべき定数が流出率のみとなるため、以下の検討を行った。

1) 現時刻合わせ定数変動方式(流出率f補正)

貯留関数法による予測モデルと同様に、誤差を毎正時実測値が得られるたびに流出率で修正し、予測値を接近させていくフィードバック手法である現時刻合わせ定数変動方式(流出率f補正)を採用する。

表-4 フィードバック手法一覧表

No ^{※1}	フィードバック手法 ^{※2}
1～4	① 現時刻合わせ定数変動方式(流出率f補正)
	② 現時刻合わせ定数変動方式(貯留量S補正)
	③ カルマンフィルター法
5～8	① 現時刻合わせ定数変動方式(流出率f補正)
9～10	① 平行移動方式(Δh合わせ)

※1 表-1に示した検討ケース番号を表す。

※2 「①」はフィードバック手法番号を表す。

表-5 フィードバック手法別水位誤差(unit:水位m)

モデル	R ² 値	絶対誤差①	絶対誤差②	絶対誤差③
貯留-流出率f補正	0.9115	0.25	0.37	0.90
貯留-貯留量S補正	0.8529	0.31	0.57	0.85
貯留-カルマンフィルター	0.8829	0.32	0.52	0.83
合成-流出率f補正	0.7747	0.44	0.57	1.42
相関-Δh合わせ	0.5951	0.70	0.58	1.86

モデル	絶対誤差④	絶対誤差⑤	最大誤差
貯留-流出率f補正	0.95	0.31	1.53
貯留-貯留量S補正	0.80	0.40	2.09
貯留-カルマンフィルター	1.14	0.42	1.97
合成-流出率f補正	1.68	0.53	2.23
相関-Δh合わせ	2.04	1.28	4.48

※網掛け部は最も精度が高いモデルを示す。

(3) 相関モデル

相関モデルでは、モデル構築時の相関回帰式をそのまま使用すると、任意時刻で大きな誤差を生じた場合、その誤差が次時刻予測に直接影響を与える。これは、表-3の洪水予測手法別水位誤差からも明らかである。

よって、貯留関数モデルならびに合成合理式モデルによる予測と同様に、実測フィードバック方式を採用する(平行移動方式)。

平行移動による方法は、現状の相関回帰式に水位ボリュームを合わせるための補正値を導入することにより、相関予測を実現する。具体的には、ΔHを予測地点の前時刻における1時間先の予測水位から予測地点の現時刻水位を減じた値と定義し、式3を採用する。

$$H(n) = \alpha R(n-K) + \beta + \Delta H \quad (式3)$$

ここに、 $H(n)$: 予測地点n時水位

$R(n-K)$: K時間前雨量

ΔH : 現時刻誤差補正値

(4) フィードバック手法の適用性検討

各種フィードバック手法を用いて、平成13年～14年洪水(2洪水)における適用性を検討した。評価手法は、モデル検証時に検討した手法と同様とし、R²値、絶対誤差、最大誤差による評価とした。

表-5に対象2洪水平均のフィードバック手法別水位誤差を示す。なお、誤差評価はリードタイムを考慮して、3時間先予測値の誤差量とした。

また、図-5に検証洪水(平成13年～14年)の洪水予測結果を示す。

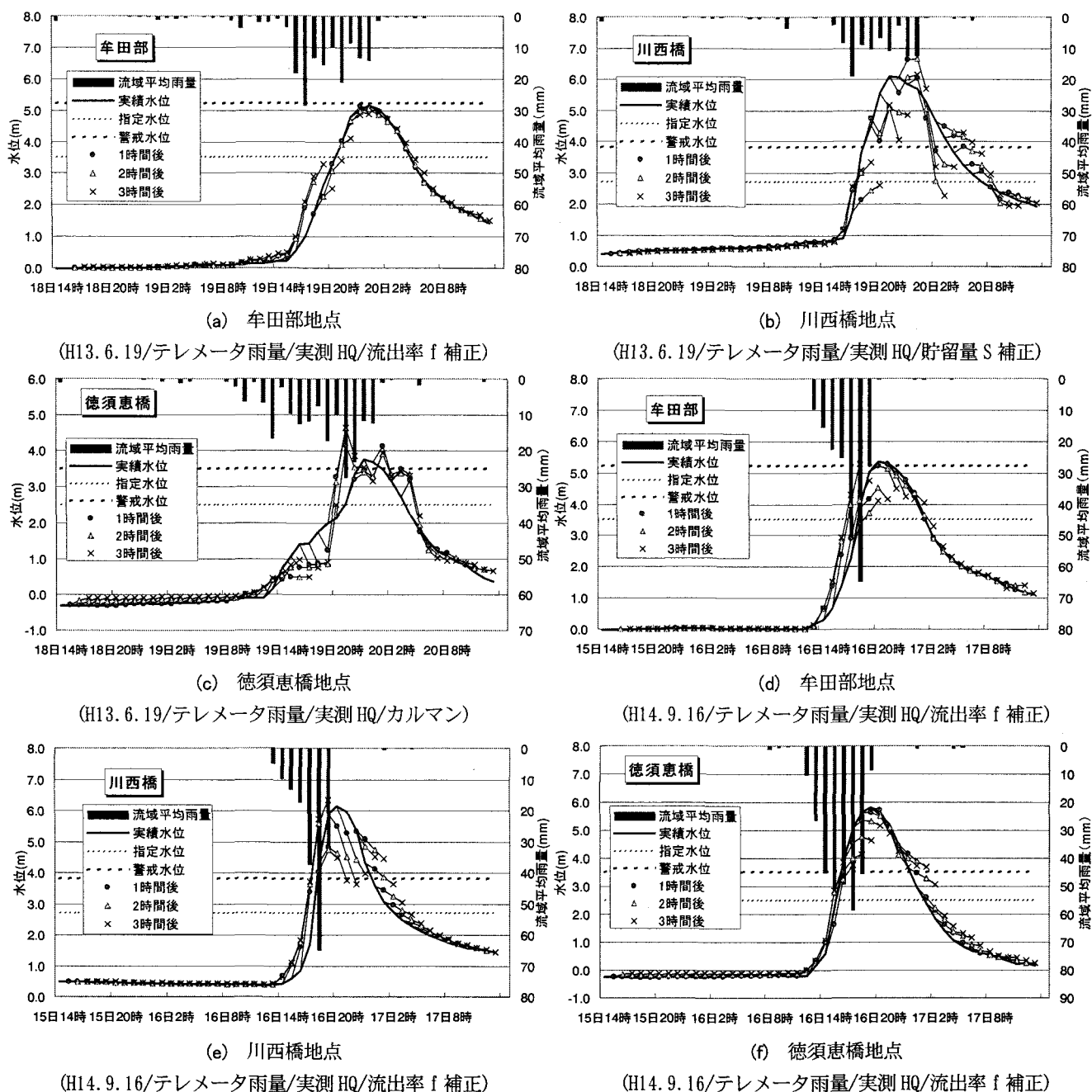


図-5 洪水予測結果(検証対象洪水：平成13～14年洪水)

表-5より、各種洪水予測手法の精度は、精度が高い手法から、貯留関数法、合成合理式法、相関法の順序であった。現在、各河川の洪水予測については、貯留関数モデルによる予測を行う河川が多く、サブシステムとして相関モデルを採用している河川が多い。今回の結果からは、中小河川の場合、流域の特性に応じて、相関モデルのほか合成合理式モデルについても検討すべきである。

また、貯留関数モデルのフィードバック手法については、表-5より、総合的に「流出率 f 補正」が最も適用性が高く、「貯留量 S 補正」や「カルマンフィルター」の適用性については、図-5(b),(c)に示す川西橋、徳須恵橋のように、流域規模が小さい場合ほど、1時間先予測から3時間先予測の間に予測値の振動が起こり、安

定性に欠ける結果となった。表-5によれば、洪水予測に必要な指定水位～ピーク水位区間では、「流出率 f 補正」よりも若干、「貯留量 S 補正」や「カルマンフィルター」の精度が高い結果となっているが、安定性を考慮して、総合的に精度が高い「流出率 f 補正」を用いるのが妥当であると考えられる。

次に、フィードバックによる精度向上度ならびに使用する雨量(テレメータ、レーダ雨量)、流量(実測、不等流計算HQ)の違いによる適用性について検討を行った。なお、本検討は各種洪水予測モデルにおいて高精度の結果が得られた貯留関数モデルで評価を行い、誤差評価はフィードバック手法検討時と同様とした。

表-6にフィードバックによる精度向上度を示し、表-7に使用雨量、流量別の誤差評価表を示す。

表-6 フィードバック無しに対する水位誤差の割合

フィードバック方式	絶対誤差①	絶対誤差②	絶対誤差③
貯留－流出率f補正	54%	71%	96%
貯留－貯留量S補正	67%	110%	91%
貯留－カルマンフィルター	69%	100%	90%

フィードバック方式	絶対誤差④	絶対誤差⑤	最大誤差
貯留－流出率f補正	99%	57%	103%
貯留－貯留量S補正	84%	74%	140%
貯留－カルマンフィルター	119%	77%	132%

※網掛け部は「流出率f補正」で精度が向上した部分を示す。

※誤差割合＝フィードバック有りの誤差/無しの誤差×100

表-7 使用雨量・流量別水位誤差の評価(unit:水位 m)

モデル	R ² 値	絶対誤差①	絶対誤差②	絶対誤差③
テレメータ雨量	0.8790	0.30	0.52	0.82
レーダ雨量	0.8858	0.28	0.44	0.90

モデル	絶対誤差④	絶対誤差⑤	最大誤差
テレメータ雨量	0.97	0.39	1.92
レーダ雨量	0.96	0.37	1.81

モデル	R ² 値	絶対誤差①	絶対誤差②	絶対誤差③
実測HQ	0.8915	0.29	0.46	0.82
不等流計算HQ	0.8734	0.29	0.50	0.90

モデル	絶対誤差④	絶対誤差⑤	最大誤差
実測HQ	0.93	0.37	1.80
不等流計算HQ	1.00	0.39	1.93

※網掛け部は精度が高い使用項目を示す。

表-6の網掛けに示すとおり、フィードバックによる精度向上度は、流出率fによる補正が安定して精度の向上が見られた。しかし、最大誤差では逆に精度が低下する結果が見られ、「流出率f補正」による課題も明らかとなった。特に、図-5(d)～(f)に示すように、中小河川では立ち上がりからピーク流量までの時間が短く(平成14年洪水:川西橋1時間最大上昇水位2.64m)、その時間が3時間程度である場合には、立ち上がり時の流出率fによって3時間先のピーク流量を予測するため、ピーク流量を過小評価する傾向が見られた。

使用する雨量・流量については、モデルの精度に大きな差異はなかった。これは、モデル構築から検証時で同種の雨量、流量を用いているためであり、モデルにその特性が反映されていることによるものである。しかし、不等流計算値では横断測量時の河道特性しか反映できないことから、河道形態の変化を捉え、予測時の河道特性を再現するためには、最新の流量観測によるHQ式を用いた洪水予測モデルの構築が望ましいと考えられる。

5. 予測雨量の適用性検討

中小河川の場合、洪水到達時間とリードタイムの関係から、実測雨量ではなく予測雨量を適用せざるを得ない。この場合、実測雨量と予測雨量の差異が直接洪水予測誤差に影響を及ぼすため、その程度を事前に想定する必要がある。

そこで、構築したモデル(流出率f補正)を用いて、レーダ短時間予測雨量(平成13年6月出水)での精度検証を行った。表-8に予測雨量を用いた場合の精度(特徴的な結果の得られた絶対誤差③、④)を示す。

表-8 予測雨量による水位誤差(実測値との割合)

予測地点	予測先	絶対誤差③	絶対誤差④
中島	1時間	85%	62%
	2時間	547%	136%
	3時間	417%	387%
徳須恵橋	1時間	76%	82%
	2時間	89%	64%
	3時間	49%	70%
川西橋	1時間	67%	77%
	2時間	134%	79%
	3時間	210%	138%
牟田部	1時間	-	82%
	2時間	-	188%
	3時間	-	86%

※網掛け部は精度が向上した部分を示す。

※誤差割合＝予測雨量による誤差/実測雨量による誤差×100

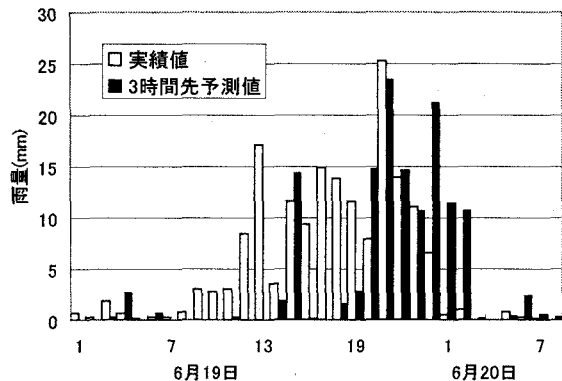


図-6 実測雨量と3時間先予測雨量(徳須恵橋地点)

表-8より、絶対誤差③、④については、誤差割合が100%以下、つまり、予測雨量投入時の方が高精度となるケースがあった。これは、フィードバックの課題として挙げた「ピークを過小評価する傾向」を予測雨量が補正したためである。例えば、図-6に示す徳須恵橋地点流域平均雨量では、3時間先予測雨量が実測雨量のピーク以降で過大な雨量を予測している。これにより、補正流出率fを過小評価した場合でも、予測雨量が大きいために水位誤差が解消される結果となった。

6. おわりに

本研究成果に示された、水文データやフィードバック手法の特性、予測雨量投入時の精度等は、今後、洪水予報河川に指定される中小河川の洪水予測システム構築に資するものである。しかし、中小河川における洪水予測モデルの課題については、図-5(d)～(f)のような集中豪雨を対象として定数解析を行うこと、10分間雨量による予測を行うことなどにより、今後、さらに踏み込んだ検討が必要である。

謝辞:モデル河川における検証にあたり、国土交通省九州地方整備局武雄河川事務所の方々には、各種データの提供をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会; 水理公式集, pp35-44, 1999.
- 2) 中小河川計画検討会; 中小河川計画の手引き(案), pp32, 1999.

(2003. 4. 11受付)