

降雨量からの河川水位予測の一手法

平岡 透¹・碓 正敬²・幸 弘美³

¹非会員 (株) 東京建設コンサルタント 環境防災部 (〒170-0004 東京都豊島区北大塚1-15-6)
E-mail:hiraoka-t@tokencon.co.jp

²正会員 (株) 東京建設コンサルタント 環境防災部 (〒170-0004 東京都豊島区北大塚1-15-6)
E-mail:ikari@tokencon.co.jp

³正会員 (株) 東京建設コンサルタント 環境防災部 (〒170-0004 東京都豊島区北大塚1-15-6)
E-mail:yuki@tokencon.co.jp

本ノートでは、流域内の降雨量から河川の水位観測所の流量を貯留関数法で推定し、推定した流量と水位観測所で計測した実績水位から水位観測所の水位予測を精度良く行う方法を提案する。まず提案法のアルゴリズムを説明し、次に実データを用いた実験を通して提案法の有効性を検証し、最後に本ノートのまとめと今後の展望について示す。

Key Words : rainfall, river water level prediction, strage function method

1. まえがき

河川氾濫に伴う人命損失などの被害を軽減するために、堤防やダム、遊水地などの治水施設のようなハード的な対策に加え、河川やダムの管理者が降雨量や河川水位などの洪水情報を収集及び解析し、関係機関や地域住民に洪水情報をインターネットや電話などで提供するソフト的な対策も重要である。洪水情報を判断材料として、関係機関は河川氾濫に備えた出動やその準備などを行い、地域住民は避難やその準備などを行うこととなる。関係機関の出動や地域住民の避難に要する時間を考慮すると、河川氾濫に大きく関与する洪水情報が河川水位であり、数時間先の河川水位を予測することが特に重要なものとなる。

河川水位予測は、水位観測所における流域の降り始めの実績降雨量と気象庁による予測降雨量、水位観測所の実績水位を基に実行される。実績降雨量から合理式や貯留関数法¹⁾などを用いて水位観測所の推定流量を求め、次に推定流量から予め設定しているH-Q曲線を用いて推定水位を求め、最後に直近の時刻の推定水位や実測水位から予測水位を求めている。また、気象庁の予測降雨量から予測流量を求め、予測流量からH-Q曲線を用いて予測水位を求めることも一般的に行われている。予測水位を求める際、実績水位を用いたフィードバックによって予測水位の精度の向上が図られている。例えば、貯留関

数法のフィードバックには、流出率を補正するf補正や貯留量を補正するS補正、カルマンフィルタを用いる方法²⁾などがある。しかし、S補正による貯留関数法で得られた予測流量からH-Q曲線で求めた予測水位は、振動が起こり安定性に欠けることがある²⁾。f補正による貯留関数法で得られた予測流量からH-Q曲線で求めた予測水位は、S補正で求めた予測水位と比較して安定性は高いが精度は若干劣り、またピーク水位を過大・過小に評価することがある²⁾。このため、f補正やS補正で求めた予測水位を実利用で使用するには課題が残る。また、カルマンフィルタによる貯留関数法は、誤差項の設定が経験的、恣意的に行われているという課題がある。

そこで、本ノートでは、貯留関数法で得られた予測流量からH-Q曲線を用いて予測水位を求める際、これまで固定であったH-Q曲線のパラメータを可変にすることによって、かつH-Q曲線のパラメータを求める際に工夫を施すことによって、予測水位の振動の発生を抑えて安定性が高く、予測精度が高く、ピーク水位を過小評価する傾向も小さい、実利用に耐えうることができる方法を提案する。また、提案法は、処理が簡便であり、処理時間がそれ程かからないという特徴もある。更に、提案法に含まれるパラメータの設定を経験的、恣意的に行うのではなく、実験を通してパラメータの設定の指標を明らかにする。

その他の関連研究として、ニューラルネットワークを

用いる方法^{7,8,9)}やNearest-Neighbor法^{10,11)}を用いる方法も存在する。これらの方法は学習データとして数時間前のデータ以外に過去の洪水時の実績降雨量や実績水位などのデータも数多く必要とするが、提案法では過去の洪水時のデータを必要としない。

2. 方法

実績降雨量より貯留関数法によって求めた水位観測所の時刻*i*の推定流量を Q_i 、推定流量 Q_i から求めた水位観測所の時刻*i*の推定水位を H_i 、時刻*i*以前の実績降雨量より貯留関数法によって求めた水位観測所の時刻*i*から*j*時間後の予測流量を $Q_i^{(j)}$ （実績降雨量より*j*時間後の予測流量を求められない場合は、時刻*i*以降の気象庁の時刻*i*から*j*時間までの予測降雨量も使用する。）、提案法によって求めた水位観測所の時刻*i*から*j*時間後の予測水位を $H_i^{(j)}$ 、水位観測所の時刻*i*の実績水位を h_i とする。推定流量 Q_i より推定水位 H_i を求める際には、多くの現場で用いられている式(1)の関係（H-Q曲線式¹²⁾を用いる。

$$Q_i = \alpha_1 (H_i + \alpha_2)^2 \quad (1)$$

ここで、 α_1 と α_2 は実数であり、 α_2 は推定水位 H_i を補正するパラメータである。

以下、時刻*i*から*k*時間前までの推定流量 Q_i と予測水位 $H_i^{(j)}$ 、実績水位 h_i を用いて、時刻*i*から*j*時間後の予測水位 $H_i^{(j)}$ を求めることを考える。このとき、 $j \leq k$ の関係が成り立つものとする。

まず、式(2)の評価式を満たす α_1 、 α_2 、 α_3 を求める。

$$\begin{aligned} \min_{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3} & \sum_{l=i-k}^{l=i-j} (\beta_1 (Q_l - \alpha_1 (h_l + \alpha_2)^2)^2 \\ & + \beta_2 ((Q_l^{(j)} - \alpha_1 (h_{l+j} + \alpha_2)^2) - \alpha_3)^2) + \\ & \sum_{l=i-j+1}^{l=i} (\beta_1 (Q_l - \alpha_1 (h_l + \alpha_2)^2)^2 \\ & + \beta_2 ((Q_l^{(j)} - \alpha_1 (H_l^{(j)} + \alpha_2)^2) - \alpha_3)^2) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 β_1 と β_2 は正定数である。式(2)の β_1 を乗じている項は、式(1)における推定流量 Q_i と実績水位 h_i の関数に差が生じないようにするためのものである。一方、式(2)の β_2 を乗じている項は、式(1)における予測流量 $Q_i^{(j)}$ と実績水位 h_i 及び予測水位 $H_i^{(j)}$ の関係で生じた差を α_3 で除去するためのものである。 β_1 が大きい程、推定流量 Q_i と実績水位 h_i の関係により α_1 と α_2 が決定される影響が大きくなる。一方、 β_2 が大きい程、予測流量 $Q_i^{(j)}$ と予測水位 $H_i^{(j)}$ の関係により α_1 、 α_2 、 α_3 が決定される影響が大きくなる。式(2)の2つのサンメンションの内、

1つ目のサンメンションは実績水位 h_i を扱える時刻での計算を、2つ目のサンメンションは実績水位 h_i を扱えずに予測水位 $H_i^{(j)}$ を扱う時刻での計算を意味している。予測水位 $H_i^{(j)}$ は、予測流量 $Q_i^{(j)}$ と時刻*i*-1で得られた α_1 、 α_2 、 α_3 より求めた値（式(5)参照）を予め設定した。

式(2)の解は、以下のような反復解法で求める。この反復解法は、予測水位 $H_i^{(j)}$ に振動が起こる原因を取り除き、安定性の高い解が得られるという利点がある。反復解法の欠点として、多くの計算時間を要すると考えられるため、以下の実験で計算時間の検証を行うことにする。 α_1 と α_3 は、式(2)において α_1 と α_3 でそれぞれ偏微分して、イコール0と置き、式(3)のように変形することで求める。

$$\alpha_1^{(\epsilon+1)} = \frac{x_1 + x_2}{x_3 + x_4} \quad (3)$$

$$\alpha_3^{(\epsilon+1)} = \frac{x_5 + x_6}{k + 1}$$

subject to

$$x_1 = \sum_{l=i-k}^{l=i-j} (\beta_1 Q_l (h_l + \alpha_2^{(\epsilon)})^2 + \beta_2 (Q_l^{(j)} - \alpha_3^{(\epsilon)}) (h_{l+j} + \alpha_2^{(\epsilon)})^2)$$

$$x_2 = \sum_{l=i-j+1}^{l=i} (\beta_1 Q_l (h_l + \alpha_2^{(\epsilon)})^2 + \beta_2 (Q_l^{(j)} - \alpha_3^{(\epsilon)}) (H_l^{(j)} + \alpha_2^{(\epsilon)})^2)$$

$$x_3 = \sum_{l=i-k}^{l=i-j} (\beta_1 (h_l + \alpha_2^{(\epsilon)})^4 + \beta_2 (h_{l+j} + \alpha_2^{(\epsilon)})^4)$$

$$x_4 = \sum_{l=i-j+1}^{l=i} (\beta_1 (h_l + \alpha_2^{(\epsilon)})^4 + \beta_2 (H_l^{(j)} + \alpha_2^{(\epsilon)})^4)$$

$$x_5 = \sum_{l=i-k}^{l=i-j} (Q_l^{(j)} - \alpha_1 (h_{l+j} + \alpha_2))$$

$$x_6 = \sum_{l=i-j+1}^{l=i} (Q_l^{(j)} - \alpha_1 (H_l^{(j)} + \alpha_2))$$

α_2 を α_1 と α_3 と同様な解法で求めると、 α_2 が想定される範囲内の値と大きくかけ離れた値を取る場合があり、これが予測水位 $H_i^{(j)}$ に振動が発生する要因となっていると考えられたため、式(4)のような解法を用いた。

$$\alpha_2^{(\epsilon+1)} = \min_{\alpha_2'} E^{(\epsilon+1)} \alpha_2' \quad (4)$$

subject to α_2' は、 $\alpha_2^{(\epsilon)} \pm S$ の範囲の d_s 刻みの値で且つ、 $\pm T$ の範囲の値である。

$$\begin{aligned} E^{(\epsilon+1)} = & \sum_{l=i-k}^{l=i-j} (\beta_1 (Q_l - \alpha_1^{(\epsilon+1)} (h_l + \alpha_2')^2)^2 + \\ & \beta_2 ((Q_l^{(j)} - \alpha_3^{(\epsilon+1)} (h_{l+j} + \alpha_2')^2) - \alpha_3^{(\epsilon+1)})^2) \\ & + \sum_{l=i-j+1}^{l=i} (\beta_1 (Q_l - \alpha_1^{(\epsilon+1)} (h_l + \alpha_2')^2)^2 + \\ & \beta_2 ((Q_l^{(j)} - \alpha_3^{(\epsilon+1)} (H_l^{(j)} + \alpha_2')^2) - \alpha_3^{(\epsilon+1)})^2) \end{aligned}$$

ここで、 ζ は反復回数である。以下の実験では、 $E^{(\zeta)} - E^{(\zeta+1)} \leq 10^{-6}$ となれば、反復解法の処理が収束したと判断して、処理を終了した。また、 S と d_s は正定数で、計算時間を考慮して、以下の実験ではそれぞれ 0.1m と 0.001m とした。 T は、 α_2 の値を決める要素であり、 α_2 が水位を補正するパラメータであるため、また α_2' が余りに 0 からかけ離れた値において局所解が得られる可能性があるため、以下の実験では 1.0m とした。ここでの留意点として、式(4)の $E^{(\zeta+1)}$ を求める際に、 α_2' を加えている括弧内の値（例えば $(h_{t+j} + \alpha_2')$ ）が負の値にならないように、 α_2' を選択することが挙げられる。更に、 $\alpha_2^{(\zeta+1)}$ を求める処理を高速化するために、全探索ではなく、まず $\alpha_2^{(\zeta)}$ を中心に ± 0.1 の範囲を 0.01m 刻みで探索し、次に求めた値を中心に ± 0.01 の範囲を 0.001m 刻みで探索する。

最後に、以上で求めた α_1 、 α_2 、 α_3 を基に、時刻 i から j 時間後の予測水位 $H_i^{(j)}$ を式(5)で求める。式(5)は、推定水位 H_i ではなく予測水位 $H_i^{(j)}$ を求めるため、式(1)の右辺に α_3 を加えた式を変換することで得られる。

$$H_i^{(j)} = \sqrt{\frac{Q_i^{(j)} - \alpha_3}{\alpha_1}} - \alpha_2 \quad (5)$$

3. 実験

提案法を流域面積が 167.3km² の地点の 5 洪水に適用した。この流域の特徴として、土地利用率が建物用地 1.7%、水田 5.1%、森林 89.6%、水域 1.1%、その他 2.5% であり、表層地質（岩石区分）が主に火山性岩石（凝灰岩質岩石）である。5 洪水の貯留関数法で求めた推定流量と実績水位の関係を 図-1 に示す。 図-1 において、横軸が推定流量、縦軸が実績水位である。また、5 洪水の流域平均降雨量と水位観測所の実績水位のハイドログラフを 図-2 に示す。 図-2 において、横軸が時間、左縦軸が水位、右縦軸が降雨量であり、 図-2 の上部に流域内平均降雨量を棒グラフで、下部に実績水位を折れ線グラフで表現している。

まず、 k を 3 とし、 β_1 と β_2 の値を変えて、 j が 1 と 3 の場合、つまり時刻 i から 1 時間後と 3 時間後の予測水位 $H_i^{(1)}$ と $H_i^{(3)}$ をそれぞれ求めた。また、貯留関数法の遅滞時間が 3 時間であったため、予測流量 $Q_i^{(j)}$ として貯留関数法で求めた推定流量 Q_{i+j} を用いた。 β_1 と β_2 の組み合わせは、(1.00, 1.00), (1.00, 0.10), (1.00, 0.01), (1.00, 0.00), (0.10, 1.00), (0.01, 1.00), (0.00, 1.00) の 7 通りとした。これらの組み合わせにおける 1 時間後と 3 時間後の予測水位と実績水位との較差の絶対値の平均と最大値をそれぞれ表-1

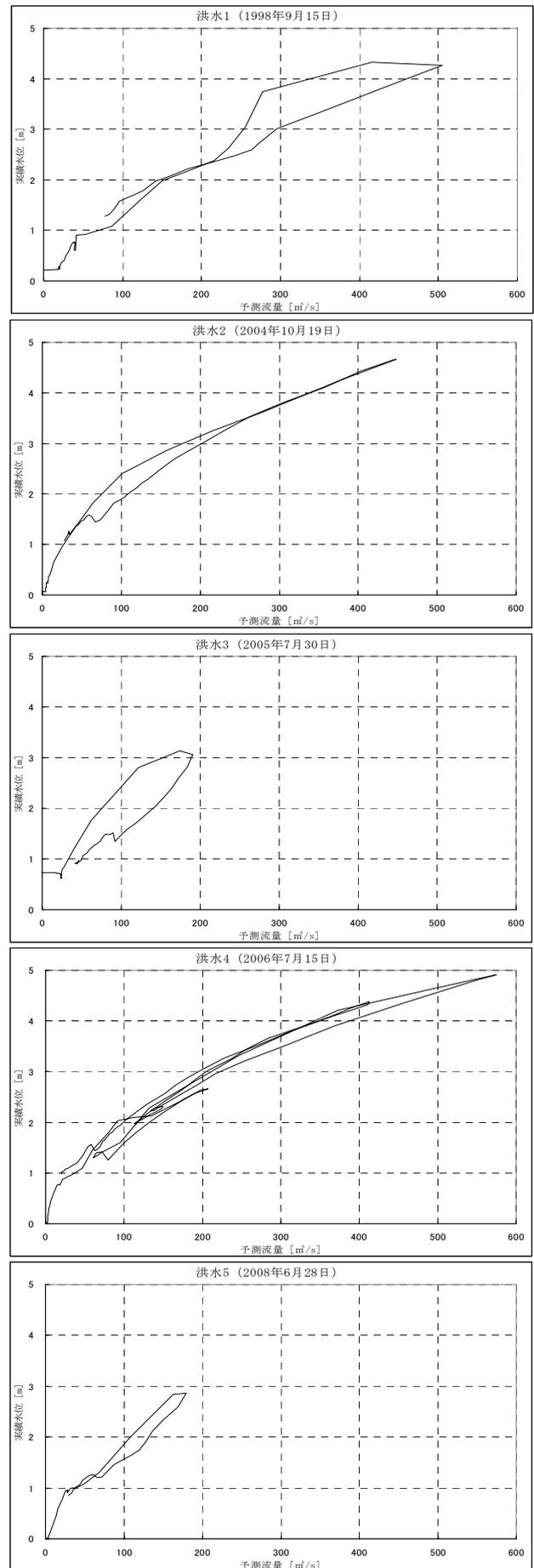


図-1 予測流量と実績水位の関係

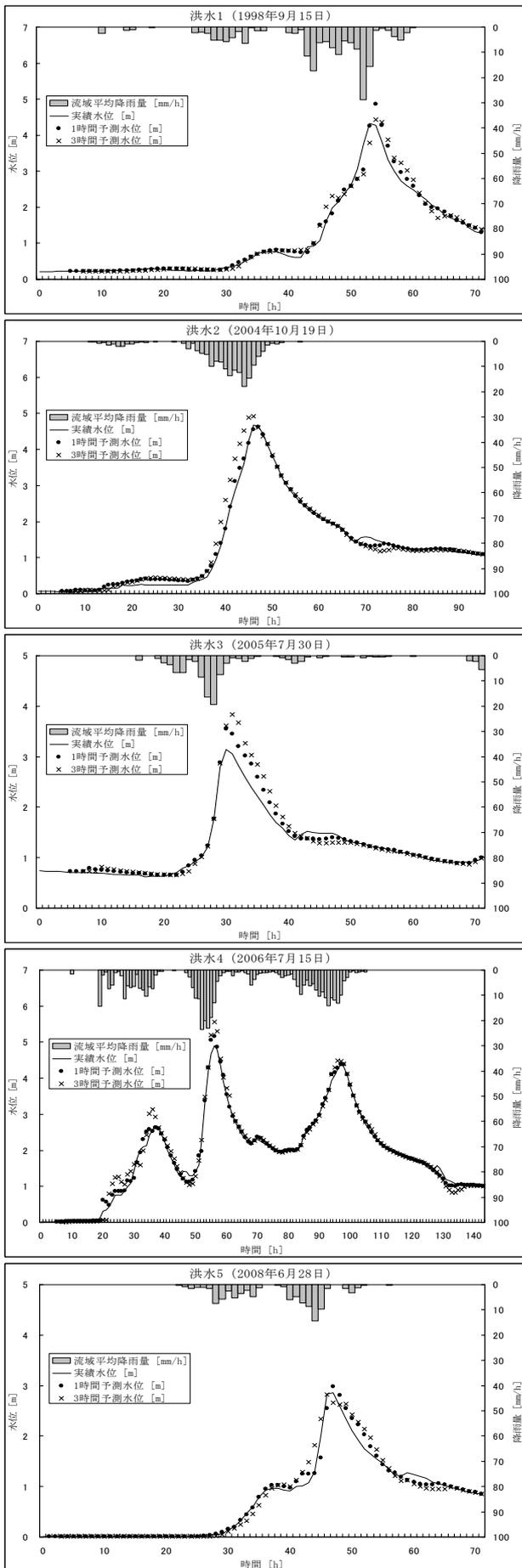


図-2 降雨量, 実績水位, 1時間と3時間予測水位

表-1 β_1 と β_2 の値の設定による予測水位と実績水位との較差の絶対値の平均と最大値 [m]

パラメータの設定		較差			
		1時間予測		3時間予測	
β_1	β_2	平均	最大	平均	最大
1.00	1.00	0.109	1.119	0.265	3.757
1.00	0.10	0.080	0.733	0.173	1.871
1.00	0.01	<u>0.075</u>	0.721	<u>0.135</u>	<u>1.073</u>
1.00	0.00	<u>0.075</u>	<u>0.720</u>	0.141	1.165
0.10	1.00	0.147	2.038	0.346	4.371
0.01	1.00	0.158	2.179	0.304	1.629
0.00	1.00	0.163	2.195	1.083	4.738

※ 下線は, 1時間予測及び3時間予測において平均較差と最大較差がそれぞれ最小となる場合である。

表-2 予測水位と実績水位との較差の絶対値の平均と最大値 [m]

予測	較差	k の値				
		3	4	5	6	7
1時間	平均	<u>0.075</u>	0.080	0.084	0.088	0.091
	最大	0.721	<u>0.718</u>	0.725	0.733	0.727
3時間	平均	0.133	<u>0.132</u>	0.135	0.136	0.139
	最大	1.073	0.915	<u>0.884</u>	0.919	0.911

※ 下線は, 1時間予測及び3時間予測において平均較差と最大較差がそれぞれ最小となる場合である。

に示す。表-1より, 1時間予測では β_1 と β_2 の組み合わせが(1.00, 0.00), 3時間予測では(1.00, 0.01)の場合に較差が最小となることが分かった。つまり, 1時間予測では式(2)の β_2 を乗じている項の影響を全く受けない方が良く, 3時間予測では式(2)の β_2 を乗じている項の影響を全く受けないよりも若干受けた方が良いことから, β_1 と β_2 の組み合わせは(1.00, 0.01)辺りが良いと判断した。

次に, β_1 と β_2 の組み合わせを(1.00, 0.01)として (以下の実験では全てこの設定する。), k を3, 4, 5, 6, 7と変えて, 時刻*i* から1時間後と3時間後の予測水位 $H_i^{(1)}$ と $H_i^{(3)}$ をそれぞれ求めた。この結果得られた1時間後と3時間後の予測水位と実績水位との較差の絶対値の平均と最大値をそれぞれ表-2に示す。表-2より, k の値が4前後で1時間予測及び3時間予測の平均較差と最大較差が最小となり, k の値が4前後から k の値が大きくなる程平均較差と最大較差も大きくなることから, k の値は4前後を使用すれば良いと判断した。

更に, k の値が4の場合の5洪水の1時間予測水位と3時間予測水位をそれぞれ●と×の点として図-2に示す。図-2より, 1時間予測において, 水位のピーク部分及び

表3 提案法の平均計算時間 [s]

	kの値				
	3	4	5	6	7
1時刻当たり	0.004	0.005	0.006	0.007	0.007

ピーク手前においても予測水位は実績水位の線形状を精度良く再現し、実績水位よりも若干大きな値をとることが分った。3時間予測において、洪水1と洪水5の水位のピーク部分及びピーク手前で予測水位を若干小さく見積もる結果となったが、実績水位の線形状を精度良く再現していることが分った。1時間予測と3時間予測において、予測水位の振動の発生もなく、予測水位が安定して求まっていることも分った。

最後に、 k の値が3, 4, 5, 6, 7のそれぞれの場合において、5洪水における1時間予測と3時間予測の1時刻当たりの提案法の計算時間の平均を表-3に示す。表-3より、1時刻当たりの平均計算時間は k の値がいずれの場合においても0.01秒以下となり、多くの計算時間を要しないことから、実利用に対して有効に活用できることが分った。

本実験で使用したPCはHP Compaq dx7400 Microtower, CPUはIntel(R) Core(TM)2 Duo CPU E85000 3.16GHz 1.99GHz, メモリは3.25GB RAMである。

4. 結論

予測水位の振動の発生を抑えて安定性が高く、予測精度が高く、ピーク水位を過大・過小に評価する傾向も小さく、処理時間もそれ程掛からない、実利用に耐えうる方法を提案し、実データを用いた実験を通してその有効性を検証した。3時間予測において水位のピーク部分及びピーク手前で予測流量を若干小さく見積もる場合もあったが、提案法は実利用にも耐えられるものと考えられる。また、提案法に含まれるパラメータの設定を経験的、恣意的に行うのではなく、実験を通して設定のための指標を明らかにしたことで、今後の利用促進に貢献できると考えている。

今後の課題は、気象庁の予測雨量を用いることで、3時間より先の予測水位を求め、提案法によって何時間先までの水位の予測が実利用に対して有効なものとなるかを検証することである。また、より多くの実データに対して検証し、その結果を踏まえてより精度良く水位予測

を行えるようにアルゴリズムを改良することも今後の課題である。

参考文献

- 1) 浅枝隆, 鈴木篤, 玉井信行, 西川肇, 安田実: 大学土木河川工学, pp.34-43, オーム社, 1999.
- 2) 天野卓三, 三輪準二, 水草浩一, 金木誠: 中小河川における洪水予測手法に関する研究, 土木学会第58回年次学術講演会, pp.43-44, 2003.
- 3) 山本隆広, 陸旻皎: 水文データ分解能の影響を受けない貯留関数パラメータ推定の試み, 水工学論文集, 第50巻, pp.193-198, 2006.
- 4) 橋本織秀, 兪朝夫, 星清: 洪水流出予測における実際的課題とその解析法, 水工学論文集, 第36巻, pp.567-572, 1992.
- 5) 河村明: 貯留関数法を用いたカルマンフィルターによる洪水流出の実時間予測, 水理公式集例題プログラム集 CD-ROM 版, 土木学会, pp.1.12.1-1.12.26, 2001.
- 6) 高崎忠勝, 河村明, 天口英雄, 荒木千博: 都市の流出機構を考慮した新たな貯留関数モデルの提案, 土木学会論文集B, Vol.65, No.3, pp.151-165, 2009.
- 7) 外山かおり, 大阪忠史, 藤間聡: ニューラルネットワークを用いた洪水予測について, 土木学会北海道支部論文報告集, 第53号(B), pp.48-53, 1997.
- 8) 瀬野英二, 泉田正則, 村上研二, 松本晋: 広域雨量データを用いたニューラルネットワークによるダム流入量予測, 電気学会論文誌B, Vol.124, No.4, pp.561-568, 2004.
- 9) 中村祥宏, 三浦房紀, 田中達雄: ニューラルネットワークを用いた河川水位予測システムの開発(A. 被害予測と緊急対応), 地域安全学会梗概集, pp.15-18, 2004.
- 10) 満倉誠, 貞本均, 中津川誠: Nearest-Neighbor法による大河川の洪水予測について, 河川技術論文集, 第8巻, pp.337-342, 2002.
- 11) 八田茂実, 秋野隆英, 舛屋繁和: Nearest-Neighbor法の洪水予測への適用, 土木学会北海道支部論文報告集第61号, II-12, 2005.
- 12) 建設省河川局監修, 社団法人日本河川協会: 建設省河川砂防技術基準(案)同解説一調査編, pp.52-56, 山海堂, 1997.
- 13) 福岡捷二: 洪水の水理と河道の設計法, 森北出版, 2005.
- 14) 末次忠司: 河川の減災マニュアル, 技術堂出版, 2009.
- 15) 芦田和男, 江頭進治, 中川一: 21世紀の河川学—安全で豊かな河川を目指して, 京都大学学術出版会, 2008.
- 16) 杉田倫明, 田中正: 水文科学, 共立出版, 2009.

(2009.10.15 受付)

RIVER WATER LEVEL PREDICTION FROM RAINFALL

Toru HIRAOKA, Masataka IKARI and Hiromi YUKI

In this note, we propose a new method for river water level prediction from past rainfall. The proposed method is carried out by calculating a stream flow from amount of rainfall and calculating future water level from the stream flow and measured water level at water gauge station. We prove through experiments which is used of real data that the proposed method is effective. Finally, we comment on the respects in which the proposed method is improved and on the future prospects.