

北海道開発局洪水予測システムの改良

(株) リブテック ○正 員 片山直樹
 (財) 北海道河川防災研究センター フェロー 星 清
 北海道工業大学土木工学科 フェロー 橋本識秀

1. はじめに

現在北海道開発局では、洪水予測システムとして一般化貯留関数法¹⁾が稼動中であるが、後述するように幾つかの問題点が指摘されている。これらの問題点を解決するために、損失項を含む貯留関数法（1段タンク型貯留関数モデル）^{2,5)}と地下水流出成分を含む貯留関数法（2段タンク型貯留関数法）^{3,5)}による二つの予測モデルを開発し精度の向上を図った。しかしながら、洪水流出のオンライン予測モデルの選定を行う上で、洪水防御施設操作、洪水予警報の伝達、避難・水防活動などの緊急性を考慮すると、計算時間があまりかかりすぎる複雑なモデルは極力さけるべきである。また、洪水予測の実運用という観点からは、実務者が普段から慣れ親しんでいるモデルを採用することが望ましい。以上の事実を踏まえて、現行予測モデルと新規予測モデルを併用する運用案が現場から強く要請されている。そこで、現行システムの流出モデルである一般化貯留関数法を用いた洪水予測手法を改良し、次項に示す問題点の解決を図る（図-1 参照）。

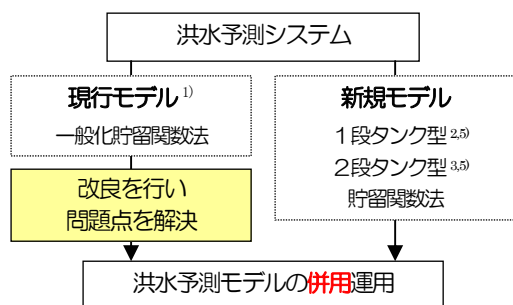


図-1 洪水予測システムの実運用概念図

2. 現行流出モデル

現行システムの流出モデルである一般化貯留関数法は次式で示される。

$$s = k_1 q^{p_1} + k_2 \frac{d}{dt} (q^{p_2}), \quad \frac{ds}{dt} = fr - q \quad (1)$$

ここに、 s ：貯留高(mm)、 r ：観測雨量(mm/h)、 q ：直接流出高(mm/h)、 f ：流出率、 t ：時間(h)、 k_1, k_2, p_1, p_2 ：モデル定数

また、 k_1 と k_2 は次式で表現される。

$$\begin{cases} k_1 = 2.823 f_c A^{0.24} \\ k_2 = 0.2835 k_1^2 (\bar{r}_e)^{-0.2648} \end{cases} \begin{cases} p_1 = 0.6 \\ p_2 = 0.4648 \\ f_c = (n/\sqrt{i})^{0.6} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 A ：流域面積(km²)、 $\bar{r}_e$ ：平均有効雨量強度(mm/h)、 n ：等価粗度(s/m^{1/3})、 i ：平均斜面勾配

3. 現行システムの問題点

現行の洪水予測システムは、式(1)の一般化貯留関数法に、予測誤差を自動補正するフィードバック手法として知られている「カルマン・フィルタ理論」を組み合わせで構築されている。このシステムは、昭和62年に初めて北海道開発局・石狩川開発建設部に導入されて以来、20年近く各開発建設部においても広く実運用され、その実績も高く評価されてきている。とくに、所定の予測精度が得られない場合には、モデル定数の修正が可能など、システムの取り扱いが比較的容易な洪水逐次予測モデルであるという現場からの意見も多い。一方、次のような問題点も指摘されている。

- (1) 有効降雨算定のための流出率 f は、既往洪水解析例をもとに設定されている。しかしながら、流出率は流域の湿潤状態に影響されるため、設定値が対象洪水と大きく異なる場合には所定の予測精度が期待できない。
- (2) モデル定数 k_1 と k_2 は本来、洪水毎に変化するはずであるが、現行システムでは固定値を用いている。また、既往洪水への適用例においても、洪水毎に k_1 と k_2 の変動幅が大きいことが確認されている。
- (3) 予測雨量誤差が水位予測誤差に及ぼす影響および予測水位誤差が統計的に正しく評価されていない。

4. 予測モデルの改良点

以上の問題点を解決するために、次のシステム改良を行う。

- (1) 一般化貯留関数法のモデル定数は k_1, k_2, p_1, p_2, f であるが、 p_1 と p_2 は式(2)に示すとおり、理論値に固定して与える。
- (2) 式(2)に示されるように、 k_1 と k_2 の定数は流域面積と平均雨量強度の関数で与えられ、 f_c の値が決定されれば、これらの定数は自動的に計算される。しかも、 f_c の変動幅は k_1 と k_2 のそれに比べてはるかに小さいことが分かる。したがって、対象洪水毎に予測精度を向上させるために更新すべきモデル定数は、 f_c と f の2個を選択した方が得策である。本報告では、これらのモデル定数を観測値が入手されるたびに、自動的に更新（オンライン同定）される。
- (3) 本報告では予測雨量の誤差を評価するために、システム入力である降雨量を「状態変量」に加えて、システム方程式の拡大を図り、予測雨量の誤差分散を取り入れた洪水予測システムを構築する⁵⁾。

5. 予測雨量の分散

気象協会から配信された予測雨量に対応する1～3時間先の実測雨量データを統計処理した結果、次の予測降雨の平均2乗誤差(S_{k+1}^2)算定式が提案されている⁴⁾。

$$\text{Var}(\hat{r}_{k+1}) = S_{k+1}^2 = a_s^2 l(\hat{r}_{k+1})^{2b_s} \quad (3)$$

キーワード：貯留関数法、カルマン・フィルタ、洪水予測

連絡先：〒065-0018 札幌市東区北18条東1丁目3-3 TEL 011-722-0483 FAX 011-722-0487

ここに、 $Var(\cdot)$ ：分散、 $\hat{f}_{k+l}$ ：予測値、 a_s 、 b_s ：予測定数
 $a_s=1.04$ 、 $b_s=0.54$ ⁴⁾、 l ：リードタイム(h)

5. 実測データへの適用

本報告で改良した一般化貯留関数法による洪水予測モデルを用いて、北海道の一級河川である石狩川の石狩大橋地点（流域面積 12,700 km²）における近年の出水である平成 13 年 9 月 11 日洪水を選定して、解析を行う。

表-1 予測雨量を用いた改良モデルによる再現結果

予測時間	1 時間先予測	3 時間先予測	6 時間先予測
実測ピーク水位	6.28m		
予測ピーク水位	6.19m (6.18m)	6.15m (6.00m)	6.14m (5.60m)
RMSE	0.06m (0.06m)	0.15m (0.18m)	0.27m (0.44m)

() は現行モデルによる再現結果

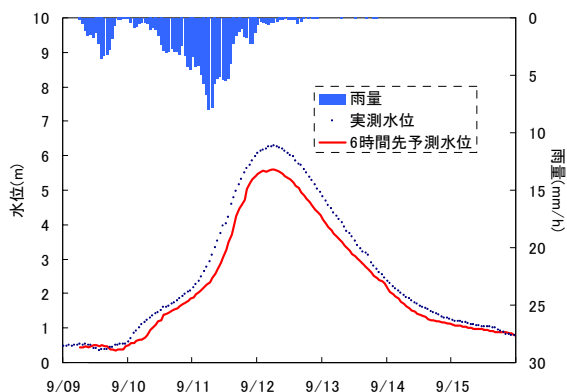


図-1 予測雨量を用いた従来モデルによる再現結果

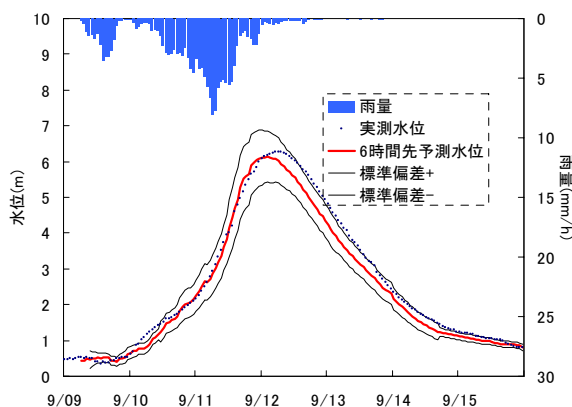


図-2 予測雨量を用いた改良モデルによる再現結果

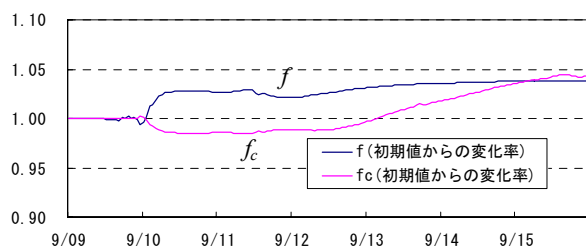


図-3 パラメータ更新値の変化率

初期条件として、流出率 f は 0.50、 f_c は 1.115 を与えた。これらの値は既往洪水を解析した結果から得られた。

気象協会より配信された平成 13 年当時の予測雨量を用いて洪水予測シミュレーションを行った(図-1、2、表-1)。

ハイドログラフの 9/11～9/12 における立ち上がり部からピークにかけての適合度が、モデルを改良したことにより改善されていることがわかる。また、ピーク水位の値は、各時間とも実測水位に近い結果となっている。実際上の洪水予測の観点からも、予測雨量の誤差分散を導入した改良洪水予測手法の有効性が検証されたと考える。図-2 の実線はモデルパラメータと予測雨量の誤差を考慮した信頼区間（予測値±標準偏差）を表しており、実測水位がその信頼区間内に収まっていることがわかる。図-3 は、モデル定数の初期値を 100% として、逐次更新される値を 1 時間ごとに変化率で表したものである。モデル定数の時間変動は小さく 5% 以内に収まっている。

以上の計算例と同様に、石狩川水系 16 地点 48 洪水・十勝川水系 32 地点 160 洪水・留萌・天塩川水系 7 地点 35 洪水において 3 時間先予測値の RMSE を用いて、改良モデルと従来モデルとの精度比較を行った。その結果、図-4 に示すように、74% の洪水例に関して、改良モデルを採用したことにより、精度の向上が見られた。

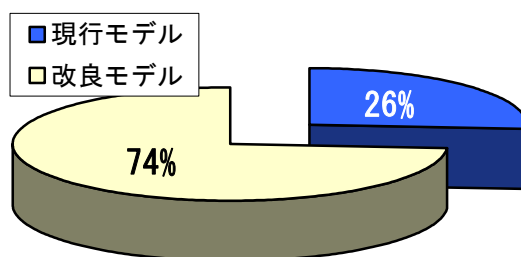


図-4 予測精度が良好なモデルの割合

11. まとめ

本報告では、改良した一般化貯留関数モデルを石狩川水系の既往洪水に適用し、洪水予測精度の向上を図った。本モデルの特徴は、カルマン・フィルターによって流出率とモデル定数をオンライン同定させることや、予測雨量の誤差を考慮して、予測水位の予測精度（信頼区間）を自動的に算定することにより、河道追跡を含むシステムにも拡張可能できた点である。

参考文献

- 1) 北海道開発局：北海道開発局の洪水予測システム，432p.，1995.
- 2) 片山直樹・星 清・橋本識秀：予測雨量の誤差を考慮した実用的洪水予測モデルの開発，土木学会北海道支部論文報告集，第 60 号，pp. 292-295，2004.
- 3) 片山直樹・星 清・橋本識秀：2003 年台風 10 号による沙流川二風谷ダム流入量予測，土木学会年次学術講演会講演概要集，II-041，pp. 81-82，2004.
- 4) 東海林 勉・星 清・渡邊 和好：予測降雨の推定誤差評価について，土木学会北海道支部論文報告集，第 60 号，pp. 296-299，2004
- 5) (財) 北海道河川防災研究センター・研究所編集・発行：実時間洪水予測システム理論解説書，396p.，2004.