

北海道における PUB の提案

A proposal of prediction of ungaged basin in Hokkaido

(株) リブテック
 (財) 北海道河川防災研究センター
 北海道工業大学土木工学科

○正員 大泉 卓也 (Takuya Ooizumi)
 フェロー 星 清 (Kiyoshi Hoshi)
 フェロー 橋本 識秀 (Norihide Hashimoto)

1. はじめに

水文観測データを用いる洪水流出解析手法は水文データが豊富でない河川流域に適用する際に大きな困難に遭遇する。とくに、発展途上国においては、流量などの水文諸量が不足しており、河川計画や管理に種々の問題が起きている。

PUB とは Prediction of Ungaged Basin の略であり、水文資料の不備な流域におけるハイドログラフを推定するという目的から、世界的にも研究が盛んである。

本報告での解析においては、北海道内一級河川 13 水系及び指定河川・標津川におけるピーク比流量 $0.4 \text{ (m}^3\text{/s/km}^2\text{)}$ 以上の 650 既往洪水資料に「損失項を含む貯留関数法 (1 段タンク型貯留関数モデル)」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モデル)」を適用してモデル定数の最適同定を行い、2つの貯留関数法による精度比較を行う¹⁾。併せて、北海道内の流量資料の不備な小流域において洪水ハイドログラフを推定する目的で、北海道を 4 地域に分割し貯留関数モデル定数の総合化 (PUB の提案) を図った。

2. 損失項を含む貯留関数法 (1 段タンク型モデル)²⁾

損失項を含む貯留関数法として、図-1に示す 1 段タンク型モデルを考え、次式の貯留関数法を用いる。

$$\frac{ds_1}{dt} = r - q_1 - b + q_0, \quad s_1 = k_{11}q_1^{p_1} + k_{12} \frac{d}{dt}(q_1^{p_2}) \quad (1)$$

$$b = k_{13}q_1 = (c_{13} - 1)q_1, \quad q_0 = q_B \exp(-\lambda t)$$

ここに、 s_1 : 貯留高 [mm]、 r : 観測雨量 [mm/h]、 q_1 : 観測流出高 [mm/h]、 b : 損失高 [mm/h]、 q_0 : 基底流出高 [mm/h]、 q_B : 初期流出高 [mm/h]、 k_{11}, k_{12} : 貯留係数、 k_{13} : 損失係数、 p_1, p_2 : 貯留指数、 λ : 減衰係数

モデル定数 p_1 と p_2 に関しては、表面流が卓越する比較的大きな出水を解析対象とする場合、マニング則を想定すると、 $p_1 = 0.6, p_2 = 0.4648$ に近似できることが知られている。モデル定数 k_{11} と k_{12} については、既往研究成果から次の関数形を仮定する。

$$k_{11} = c_{11}A^{0.24}, \quad k_{12} = c_{12}k_{11}^2(\bar{F})^{-0.2648}, \quad k_{13} = c_{13} - 1 \quad (2)$$

ここに、 A : 流域面積 [km²]、 \bar{F} : 平均雨量強度 [mm/h]、 c_{11}, c_{12}, c_{13} : 未定数

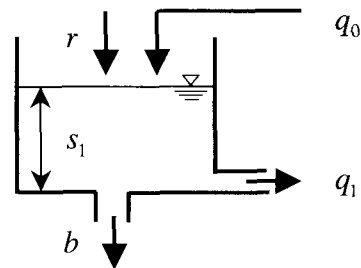


図-1 1段タンク型貯留関数流出モデル

3. 地下水流出成分を含む貯留関数法 (2 段タンク型モデル)^{3, 1)}

損失機構を持つ 1 段タンク型貯留関数モデルに地下水流出成分を追加した 2 段タンク型貯留関数モデルを導入する (図-2)。

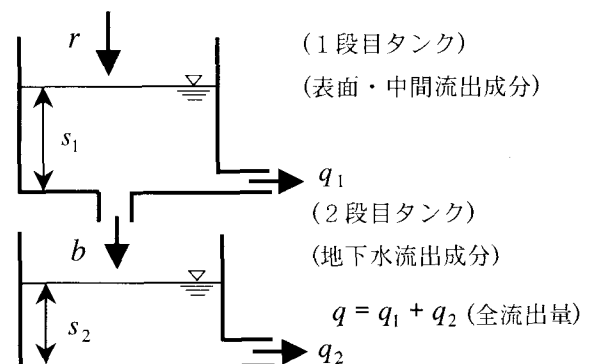


図-2 2段タンク型貯留関数流出モデル

1 段目タンクにおいては、1 段タンク型貯留関数モデルと同じ (1) 式の非線形モデルを用いる。地下水流出成分を表す 2 段目タンクは線形モデルを用いる。

2 段目のタンクの線形モデルは次式で表現される。

$$s_2 = k_{21}q_2 + k_{22} \frac{dq_2}{dt}, \quad \frac{ds_2}{dt} = b - q_2 \quad (3)$$

ここに、 s_2 : 2 段目タンク貯留高 [mm/h]、 q_2 : 地下水流出高 [mm/h]、 b : 浸透供給高 [mm/h]

2 段目タンクの貯留係数 k_{21} と k_{22} については、流出成分の分離法より求められる c_0 と c_1 の値を利用して、次式で近似表現されることが知られている³⁾。

$$k_{21} = c_1k_{22}, \quad k_{22} = k_{13}/c_0, \quad c_0 = (\delta/T_c)^2, \quad c_1 = \delta^2/T_c \quad (4)$$

ここに、 k_{21}, k_{22} : 2 段目タンクの貯留係数、 c_0, c_1 : 既

知定数、 T_c : 地下流出成分の分離時定数、 δ : 減衰係数
 T_c は、ハイドログラフの低減部より決定される定数である。 δ は通常2.0~3.0の値をとるが、本検討では $\delta = 2.1$ とした。その結果、2段目タンクの未知定数は k_{13} だけとなる。

1段目(表面・中間流出成分)の流出高 q_1 と2段目(地下水流出成分)の流出高 q_2 を合計して、全流出高 q とする。

$$q = q_1 + q_2 \quad (5)$$

4. 1段・2段型貯留関数モデルによる適用例

道内一級河川13水系において、昭和36年から平成13年までに観測された洪水資料650洪水資料について計算を行った。観測地点122箇所における全水系の流域面積の統計量は、平均(μ)が581.0 km^2 で標準偏差(σ)は438.6 km^2 となり、全流域における $\mu \pm \sigma$ 内の標本数は74で約61%の集中度を示した。図-3は解析対象の全水系の流域面積度数分布である。流域面積の規模は、300 km^2 以下が48%、600 km^2 以下が64%であり、斜面流出が卓越し、河道の遅れ効果が少ない河川流域であると考えられる。

全650洪水における比流量の統計量は、平均(μ)が1.04で標準偏差(σ)は0.76となり、全洪水における $\mu \pm \sigma$ 内の標本数は569で約88%の集中度を示した。図-4はピーク比流量の度数分布であり、約83%のデータが0.5以上の範囲に含まれている。

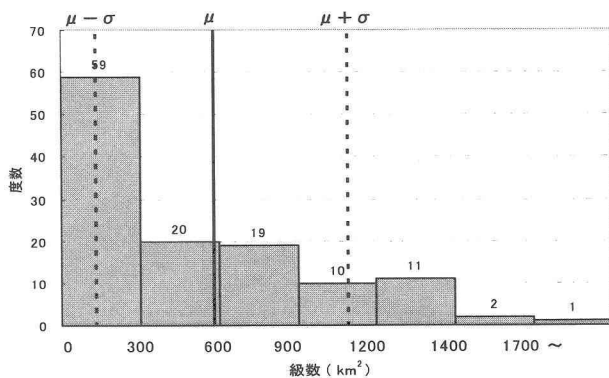


図-3 全水系における流域面積の度数分布

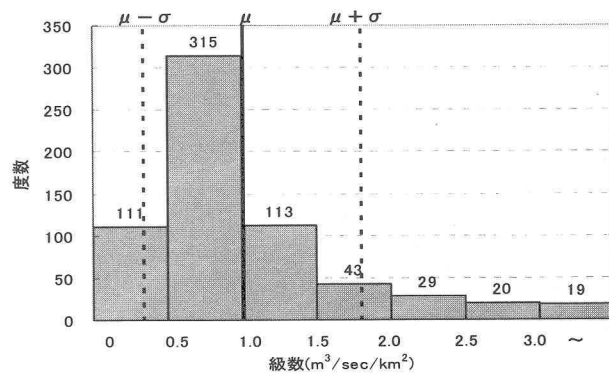


図-4 全水系における比流量の度数分布

実測ハイドログラフと計算ハイドログラフの精度評価を次式で計算する。

$$\text{ピーク誤差} \quad J_{PE} = \frac{|q_p^* - q_p|}{q_p^*} \quad (6)$$

$$\text{相対誤差} \quad J_{RE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|q_{si}^* - q_{si}|}{q_{si}^*}$$

ここに、 q_p^* : 観測ピーク流出高 [mm/h]、 q_p : 計算ピーク流出高 [mm/h]、 q_{si}^* : 観測流出高 [mm/h]、 q_{si} : 計算流出高 [mm/h]、 N : 流量標本数

全水系における1段タンク型モデルと2段タンク型モデルによる観測ピーク流出高と計算ピーク流出高の比較を、それぞれ、図-5と図-6に示す。

ピーク相対誤差(J_{PE})を比較した結果においては、1段タンク型モデルに比べて2段タンク型モデルの方が小さい値を示しており、2段タンク型モデルのピーク流出高の再現性が向上していることがわかる。

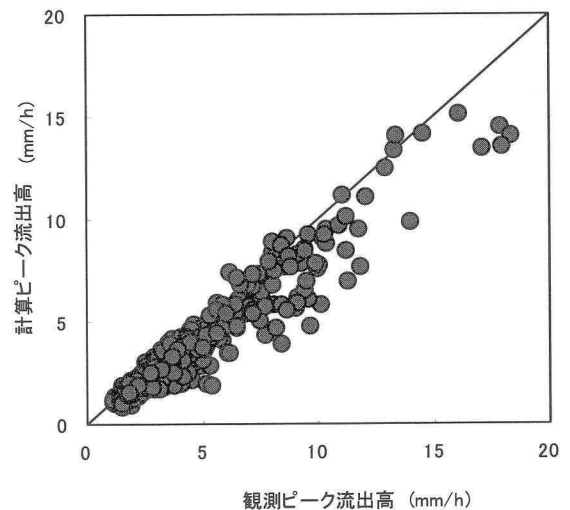


図-5 1段タンク型モデルによるピーク流出高の比較(全データ)

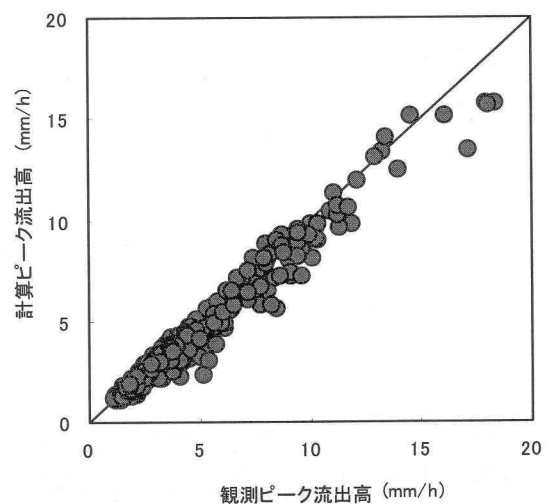


図-6 2段タンク型モデルによるピーク流出高の比較(全データ)

5. 北海道4地域におけるモデル定数の総合化

洪水ハイドログラフを推定するために、モデル定数の総合化を行った。既往洪水資料から流域の特性を考慮して、北海道を4地域に分割した結果を図-7に示す。表-1には各地域に属する河川名と解析洪水数を示す。

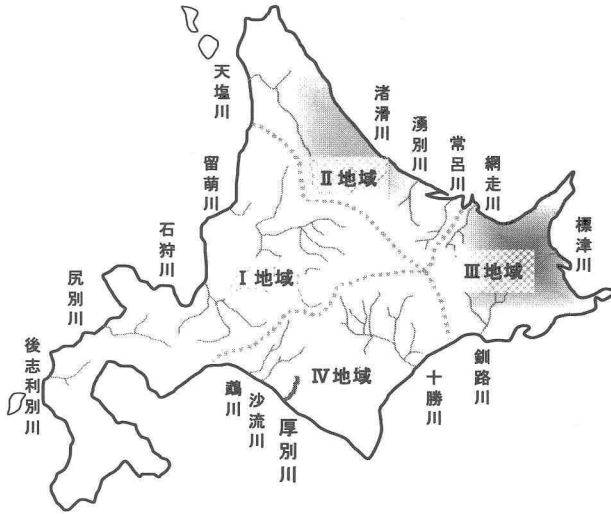


図-7 北海道における4地域の分類

表-1 地域区内の河川と解析洪水数

地域区	河川名	洪水数
I 地域	留萌川・石狩川・尻別川・後志利別川	245
II 地域	天塩川・渚滑川・湧別川・常呂川	159
III 地域	網走川・標津川・釧路川	66
IV 地域	鶴川・沙流川・十勝川	180

表-2 地域毎のモデル定数統計量 (1段タンク型モデル)

地域区	c_{11}		c_{12}		c_{13}	
	平均 (μ)	標準偏 差(σ)	平均 (μ)	標準偏 差(σ)	平均 (μ)	標準偏 差(σ)
I 地域	11.092	3.821	0.142	0.096	1.690	0.531
II 地域	11.822	4.206	0.153	0.119	1.461	0.431
III 地域	20.316	6.881	0.082	0.044	3.184	1.261
IV 地域	12.152	3.668	0.125	0.070	1.568	0.684
全水系	12.501	5.035	0.134	0.094	1.752	0.824

表-3 地域毎のモデル定数統計量 (2段タンク型モデル)

地域区	c_{11}		c_{12}		c_{13}	
	平均 (μ)	標準偏 差(σ)	平均 (μ)	標準偏 差(σ)	平均 (μ)	標準偏 差(σ)
I 地域	7.919	2.950	0.308	0.225	2.275	0.827
II 地域	8.308	3.321	0.348	0.208	2.323	0.759
III 地域	14.005	4.485	0.180	0.102	4.283	1.363
IV 地域	8.535	2.689	0.303	0.229	2.305	0.967
全水系	8.803	3.618	0.304	0.217	2.499	1.097

表-4 地域毎の誤差統計量 (1段タンク型モデル)

地域区	J_{PE}		J_{RE}	
	平均(μ)	標準偏差 (σ)	平均(μ)	標準偏差 (σ)
I 地域	0.169	0.133	0.173	0.083
II 地域	0.150	0.105	0.131	0.061
III 地域	0.208	0.119	0.166	0.071
IV 地域	0.179	0.121	0.146	0.064
全水系	0.171	0.123	0.155	0.074

表-5 地域毎の誤差と T_c 統計量 (2段タンク型モデル)

地域区	J_{PE}		J_{RE}		T_c	
	平均 (μ)	標準偏 差(σ)	平均 (μ)	標準偏 差(σ)	平均 (μ)	標準偏 差(σ)
I 地域	0.093	0.091	0.317	0.622	59.9	25.0
II 地域	0.071	0.062	0.202	0.165	63.3	19.7
III 地域	0.084	0.070	0.189	0.118	67.6	20.5
IV 地域	0.100	0.077	0.181	0.097	60.6	19.7
全水系	0.089	0.079	0.238	0.400	61.7	22.0

全水系及び地域毎の1段タンク型モデル定数統計量と2段タンク型モデル定数統計量をそれぞれ、表-2と表-3に示す。表-4と表-5にはそれぞれ、地域毎の1段・2段タンク型モデルによる誤差統計量および T_c (分離時定数)の値が示されている。モデル定数に関して、 c_{11} 、 c_{12} 、 c_{13} の値が1段・2段タンク型モデルにおいて顕著な差異を示しているのは、III地域の網走川・標津川・釧路川であり、他の地域と比較すると、 c_{11} と c_{13} の値は大きく、 c_{12} の値は小さいことが分かる。

誤差統計量である J_{PE} (ピーク誤差)はIII地域の1段タンク型モデルで20.8%と大きかったが、2段タンク型モデルでは8.4%と小さくなり、浸透性の高いIII地域においては2段タンク型モデルの方がハイドログラフのピークの再現性が良いことが明らかとなった。

全水系における $1/c_{13}$ と Q/R (総流出量/総雨量)の関係を図-8に示す。また、表-6には4地域における $1/c_{13}$ と Q/R (総流出量/総雨量)の関係式を示す。

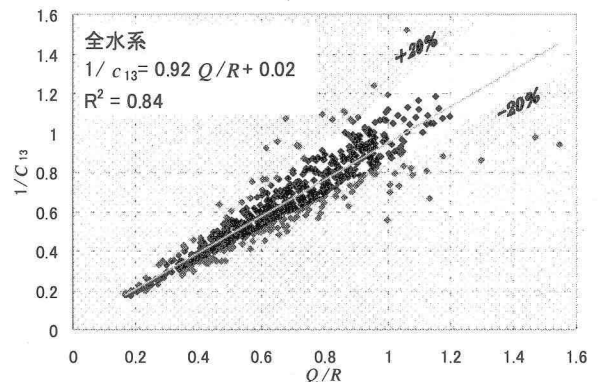


図-8 $1/c_{13}$ と Q/R (総流出量/総雨量)の関係

表-6 地域毎の $1/c_{13}$ と Q/R の関係式

地域	回帰方程式	R ² 値
I 地域	$1/c_{13} = 0.83Q/R + 0.11$	0.86
II 地域	$1/c_{13} = 0.78Q/R + 0.20$	0.66
III 地域	$1/c_{13} = 1.20Q/R - 0.04$	0.90
IV 地域	$1/c_{13} = 0.97Q/R + 0.07$	0.89

提案モデルの損失係数 c_{13} の値は、基底流出成分の分離と流出率から理論的に導かれる値の±20%内にほぼ収まっており、有効雨量を用いた手法と同等の結果が得られることを示唆している。各地域のR²値も大きく、 $1/c_{13}$ と Q/R の相関が高いことがわかる。

6. 厚別川におけるハイドログラフの推定

平成15年8月、台風10号が北海道に上陸し、甚大な被害をもたらした。門別町と新冠町を境とする厚別川流域(流域面積270km²)では既往最大の記録的な豪雨となり(総降雨量356mm、最大時間雨量47mm)、流量観測によれば比流量9.33m³/s/km²とかなり大きな値を記録したが、河川水位は計画高水位を越え、破堤や溢流し正確な観測を行うことが出来なかった。また、総雨量と総流出量の水収支の関係からも、流出率が1を超えており、観測精度に問題があったことが考えられる。そこで、平成15年8月10日洪水における厚別川流量観測所・豊田地点のハイドログラフを1段タンク型モデルと2段タンク型モデルを用いて推定した。また、この流域は、図-7のIV地域に属し、表-2と表-3に示される平均値(μ)と標準偏差(σ)を用い、安全側の計画となるようにモデル定数を選択する。 c_{11} が小さい時はハイドログラフが尖鋭化し、 c_{12} が小さくなるとピークの生起時刻が早まる。 c_{13} は流出率と高い相関関係にあり、 c_{13} が小さくなると流出率が大きくなり、総流出量が大きくなる。したがって、モデル定数 c_{11} は $\mu - \sigma$ 、 c_{12} は $\mu - \sigma$ 、 c_{13} は $\mu - \sigma$ ($c_{13} \geq 1$)の値を用いた。分離時定数 T_c はIV地域の平均値 μ (60.6hrs)を使用し、減衰係数 λ は $1/T_c$ の値から求めた。

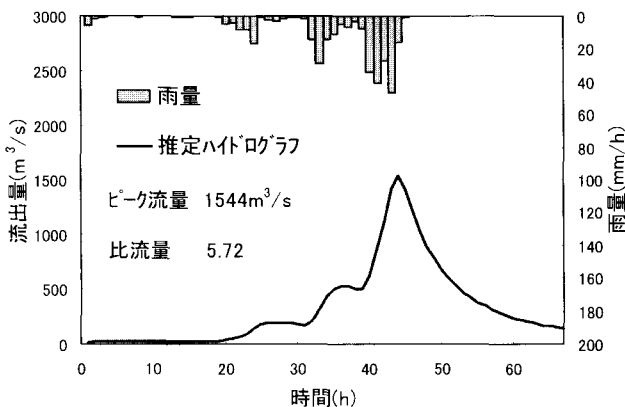


図-9 1段タンク型モデルによる推定ハイドログラフ

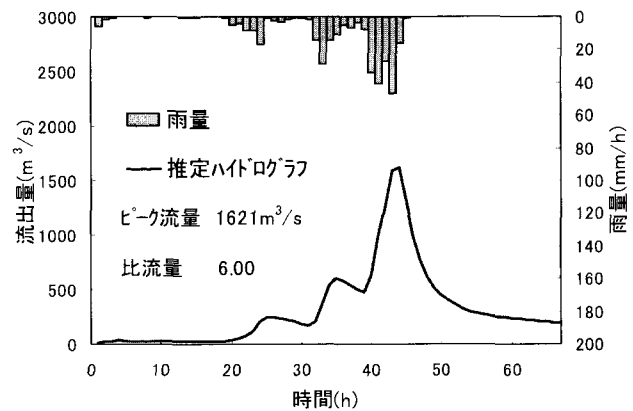


図-10 2段タンク型モデルによる推定ハイドログラフ

その結果、1段タンク型モデルの定数は $c_{11} = 8.484$ 、 $c_{12} = 0.055$ 、 $c_{13} = 1.000$ 、2段タンク型モデルの定数は $c_{11} = 5.846$ 、 $c_{12} = 0.074$ 、 $c_{13} = 1.338$ となった。図-9と図-10はそれぞれ、1段及び2段タンク型モデルによる推定ハイドログラフである。図-9と図-10の結果を比較すると、1段タンク型モデルより2段タンク型モデルの方が、推定ピーク流量が大きいことがわかる。今回の検討では、安全側から推定ピーク流量を2段タンク型モデルの1,621m³/sとするのが妥当と考えられる。

7. おわりに

本報告では、2つの貯留型流出モデルを道内一級河川の既往洪水に適用し、北海道を4地域に分割して各モデル定数の総合化と普遍化および誤差評価を試みた。各地域のモデル定数の平均値(μ)と標準偏差(σ)を流域代表値として利用すれば、水文資料の乏しい河川や流量観測資料がない流域(PUB)においても、実用上の精度をもって、流出計算可能であると考えられる。

今後、流量資料が不完備な中小河川流域において、洪水ハイドログラフを推定することが重要となってくる。そのためにも、モデル定数を総合化し、より多くの洪水事例を解析し、洪水ハイドログラフ推定精度の向上を図る必要がある。

参考文献

- 1) (財)北海道河川防災研究センター・研究所 編集・発行：単一流域を対象とした貯留関数法の精度比較, 189p., 2002.
- 2) 馬場仁志・星 清：損失機構を組み合わせた貯留関数モデルの総合化, 水工学論文集, 第43巻, pp.1085-1090, 1999.
- 3) 園山裕士・星 清・橋本謙秀：実用的2段タンク型貯留関数法の提案, 土木学会北海道支部論文報告集, 第58号, pp.336-339, 2002.
- 4) 園山裕士・星 清・橋本謙秀：2段タンク型貯留関数法の精度評価, 河川技術に関する論文集, 第8巻, pp.425-430, 土木学会, 2002.