

2 段タンク型貯留関数法の精度評価

EVALUATION OF ACCURACIES FOR FLOOD RUNOFF BY TWO-CASCADE STORAGE ROUTING MODEL

園山裕士¹・星 清²・橋本識秀³

Hiroshi SONOYAMA, Kiyoshi HOSHI and Norihide HASHIMOTO

¹正会員 (独) 北海道開発土木研究所 河川研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)

²フェロー会員 工博(財) 北海道河川防災研究センター (〒060-0042 札幌市中央区大通西1丁目 第2有楽ビル)

³フェロー会員 博士(工学) 北海道工業大学 (〒006-8585 札幌市手稲区前田7条15丁目)

The generalized storage routing model has been practically used to estimate the design flood magnitude in which the nonlinear relationship between rainfall and runoff is maintained and model parameters can easily be identified by the Newton-Raphson optimization algorithm.

The present study develops a two-cascade storage routing model in which the surface-subsurface runoff as well as groundwater runoff can well be reproduced from the viewpoint of water balance, using the observed hyetograph and hydrograph. The proposed approach was applied to 390 flood data in the rivers of Hokkaido and it was shown that the reproduction accuracy of peak runoff was remarkably improved. Moreover, an attempt was made to synthesize the three parameters in the two-cascade storage routing model, using the coefficient which is expressed by the ratio of initial flood discharge to annual low flow in the rivers of interest.

Key words: Two-cascade storage routing model, runoff component, flood runoff analysis, Newton-Raphson method

1. はじめに

従来から用いられてきた洪水流出解析におけるモデル改良の1手段として、損失機構を考慮した1段タンク型貯留関数法が普及しつつある¹⁾。また、そのモデルを応用し、計算上の負担を大幅に軽減させた2段タンク型貯留関数法も提案され、実際問題にも適用されてきている²⁾。この新しい2段タンク型貯留関数モデルを従来のモデルではハイドログラフの再現が不十分であった火山灰土壌等の浸透の大きい流域での事例に適用した結果、ハイドログラフの再現精度が向上し、とくにピーク流量の再現精度が高いことが実証された。

本研究では、北海道の一級河川13水系における390個の洪水出水事例に2段タンク型貯留関数法を用いて、定数解析を行い、計算ハイドログラフおよびピーク流量の再現性について検討する。

また、貯留関数法を用いた洪水流出計算上の問題とし

て、モデル定数の総合化が挙げられる。一般的には定数解析の結果、それぞれの洪水においては最適パラメータが同定され、良好な再現結果が得られる。しかしながら、実務上、定数解析より得られた総合化パラメータを用いたピーク流量や流量ボリュームの計算精度が、平均的にみても極端に減少しないことが理想的である。流量資料が不備な流域におけるハイドログラフを推定する観点からも、貯留関数法のモデルパラメータの総合化は重要な研究課題である^{3), 4)}。

本研究においては、洪水直前の流域湿潤状態を表す指標としての初期流出量と地下水流出特性を代表する渇水流量を最適モデル定数と関連づけることにより、モデル定数の総合化を試みた。

2. 貯留関数モデル

洪水流出解析に用いるモデルは、図-1に示される2段

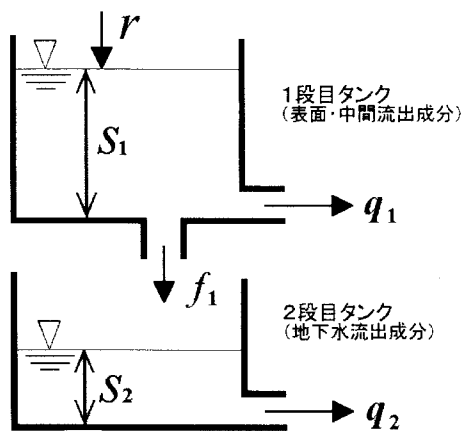


図-1 2段タンク型貯留関数モデル

タンク型貯留関数モデル（以後、2段モデルと呼ぶことにする）である。このモデルの特徴として、流出成分を表面・中間流出成分と地下水流出成分とに分離し⁵⁾、前者を(1)式の非線形方程式、後者を(3)式の線形方程式で表現している。

$$\begin{cases} s_1 = k_{11}q_1^{p_1} + k_{12} \frac{d}{dt}(q_1^{p_2}) \\ \frac{ds_1}{dt} = r - q_1 - f_1 \\ f_1 = k_{13}q_1 = k_{13}(q - q_2) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} p_1 = 0.6 \\ p_2 = 0.4648 \\ k_{11} = c_{11}A^{0.24} \\ k_{12} = c_{12}k_{11}^2(\bar{r})^{-0.2648} \\ c_{13} = k_{13} + 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} s_2 = k_{21}q_2 + k_{22} \frac{dq_2}{dt} \\ \frac{ds_2}{dt} = f_1 - q_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$k_{21} = c_1 k_{22}, \quad k_{22} = k_{13}/c_0 \quad (4)$$

$$c_0 = (\delta/T_c)^2, \quad c_1 = \delta^2/T_c \quad (5)$$

$$q = q_1 + q_2 \quad (6)$$

ここに、 s_1 ：1段目タンク貯留高[mm]、 r ：観測雨量[mm/h]、 q_1 ：表面・中間流出高[mm/h]、 f_1 ：1段目タンクから2段目タンクへの浸透供給量[mm/h]、 k_{11} 、 k_{12} 、 k_{21} 、 k_{22} ：貯留係数、 k_{13} ：損失係数、 p_1 、 p_2 ：貯留指

表-1 解析データ数

水系名	データ数
釧路川	34
網走川	6
渚滑川	31
湧別川	23
常呂川	14
十勝川	58
沙流川	47
鶴川	18
後志利別川	54
尻別川	25
天塩川	24
石狩川	32
留萌川	24
合計	390

数、 A ：流域面積[km²]、 $\bar{r}$ ：平均雨量強度[mm/h]、 c_{11} 、 c_{12} 、 c_{13} ：未知定数、 s_2 ：2段目タンク貯留高[mm/h]、 q_2 ：地下水流出高[mm/h]、 q ：全流出高[mm/h]、 T_c ：分離時定数[h]、 δ ：減衰係数（本研究では $\delta=2.1$ とした）

このとき、最適化により求めるパラメータは1段目タンクのパラメータ c_{11} 、 c_{12} 、 c_{13} の3つであり、2段目タンクのパラメータ k_{21} 、 k_{22} においては、(4)～(5)式により決定される。パラメータの決定手法の詳細については、文献1)と2)を参照されたい。また、1段タンク型貯留関数モデル（以後、1段モデルと呼ぶ）においては、図-1のモデルの1段目タンクのみを用いたモデルである。この場合、 q_1 は全流出量を意味し($q_2=0$)、 f_1 は長期の浸透量および蒸発散等の損失を表す。

3. 定数解析

2段モデルと1段モデルにおいて、最適モデル定数値をニュートン法により求める。それらの解析結果の比較により再現ハイドログラフの精度評価を行う。解析に用いたデータは表-1に示す北海道内一級河川13水系の既往洪水データ390ケースである。

再現精度の評価指標として、以下に示す最適化ピーク相対誤差 J_{PO} と最適化平均2乗誤差ボリューム E_O の2つの式を用いた。

$$J_{PO} = \frac{|q_{op} - q_{cp}|}{q_{op}} \quad (7)$$

$$E_O = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{q_{oi} - q_{ci}}{q_{op}} \right)^2 \quad (8)$$

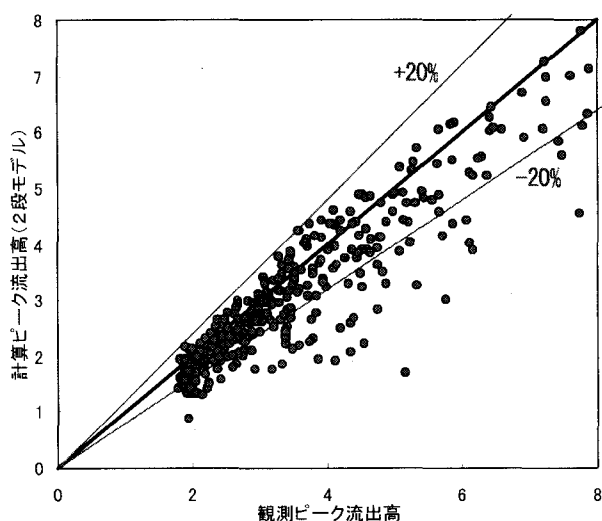


図-2 計算ピーク流出高の評価（2段モデル）

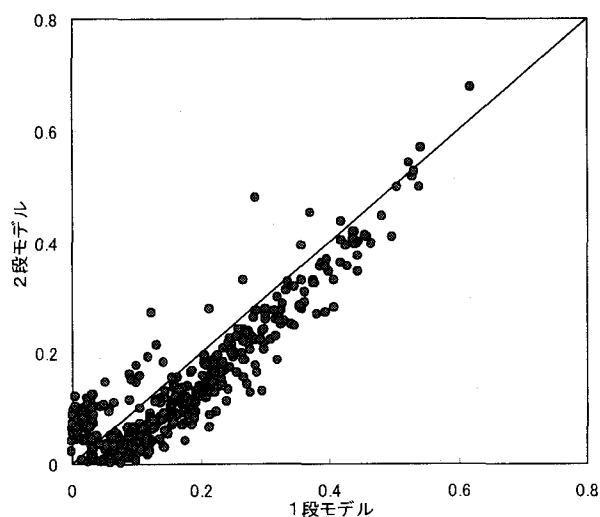


図-4 J_{PO} の比較

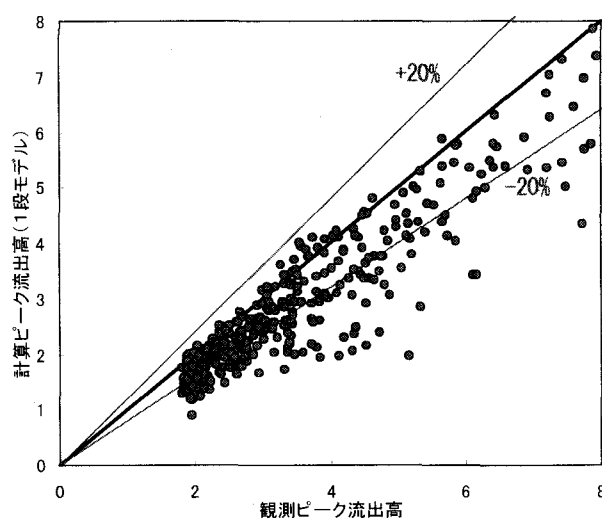


図-3 計算ピーク流出高の評価（1段モデル）

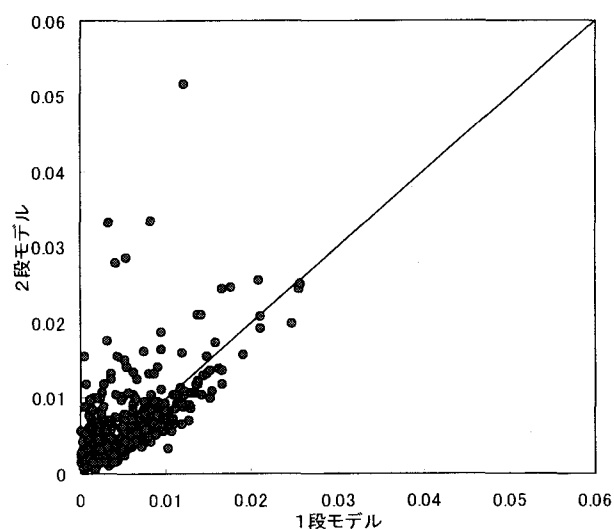


図-5 E_O の比較

ここに、 q_{op} :観測ピーク流量[m³/s]、 q_{cp} :計算ピーク流量[m³/s]、 q_{oi} : i 時刻の観測流量[m³/s]、 q_{ci} : i 時刻の計算流量[m³/s]、 N :データ数

2段モデルによる洪水の再現結果は全体に良好であった。とくに、1段モデルに比べ、ピーク付近において良好な再現結果が得られ、減衰部でわずかに観測値との差異が見られる。これは、地下水流出成分パラメータが最適化ではなく近似により導き出された(4)～(5)式により決定されているためである。2段モデルと1段モデルによるピーク値の再現結果をそれぞれ、図-2 と図-3 に示す。1段モデルにおいては、計算ピーク値が実測のそれより小さい傾向にあり、2段モデルでは、計算ピーク値が実測値に近くなっている。

390 ケースの評価指標による再現結果の比較を図-4 と図-5 に示す。その結果、2段モデルにおいて、とくにピーク値の再現性が、ほとんどの事例で向上している。また、図-6 に示されるように、ピーク相対誤差の度数分布は指数関数的であり、2段モデルのピーク誤差分布は0～0.15の間に集中しており、2段モデルが1段

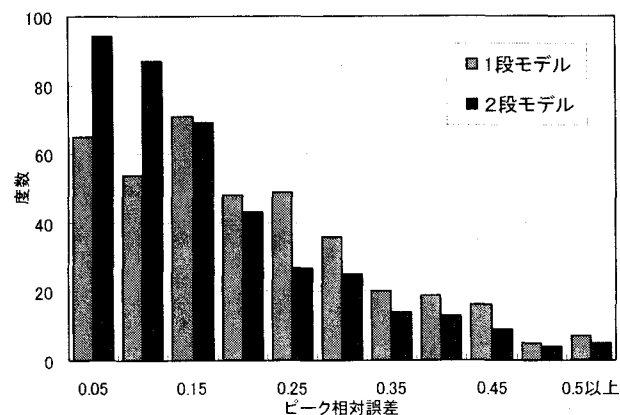


図-6 ピーク相対誤差 J_{PO} の分布

モデルに比べて、ピークの再現性が優れていることが検証された。

また、ボリューム誤差については、ピーク誤差ほどの向上がみられず、1段モデルより相対誤差が大きくなった事例もいくつか見られた。図-7 と図-8 にその一例を示す。また、2つの事例の再現精度結果を表-2 に示す。ボリューム誤差については、2段モデルにおける減衰部

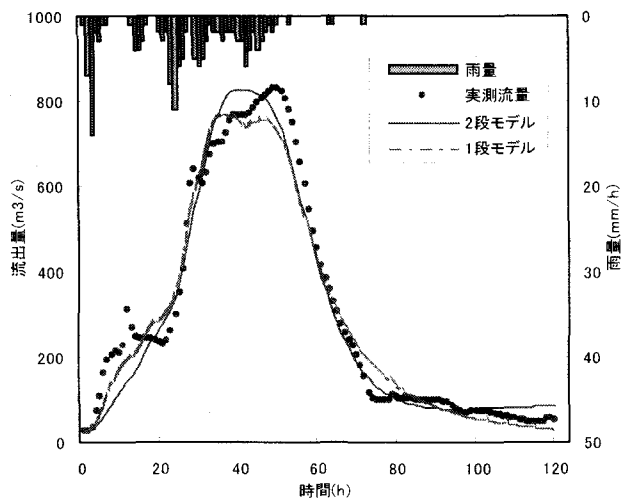


図-7 石狩川水系 雨竜川 多度志観測所
A=996.0km² 平成13年9月11日洪水

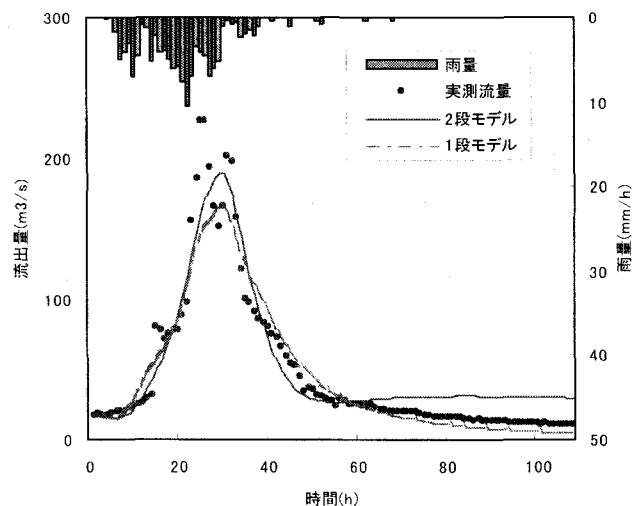


図-8 石狩川水系 忠別川 暁橋別観測所
A=263.4km² 平成13年9月11日洪水

表-2 再現精度の結果比較

	J_{PO}		E_O	
	1段モデル	2段モデル	1段モデル	2段モデル
図-7	0.071	0.004	0.0036	0.0038
図-8	0.268	0.164	0.0048	0.0055

の誤差が大きいが、目視による評価では、良好な再現性が得られていると考えられる。

4. パラメータの評価

1 段モデルと 2 段モデルのパラメータをヒストグラム (図-9) により比較する。 c_{11} の係数に関しては、1 段モデル、2 段モデル共にひずみ係数が正である非対称分布を示し、その形状もほぼ同一である。1 段モデルの

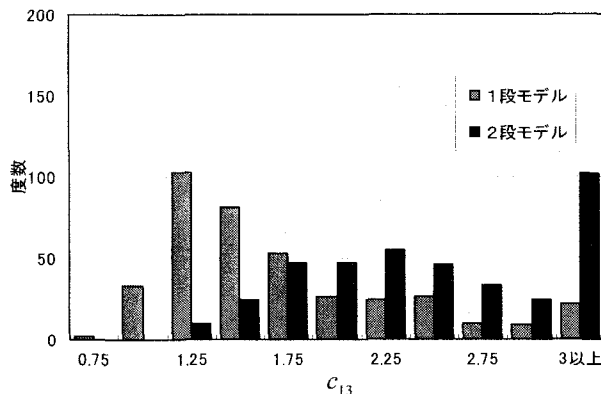
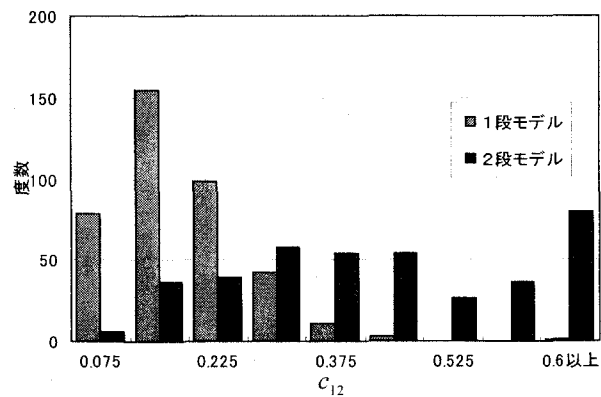
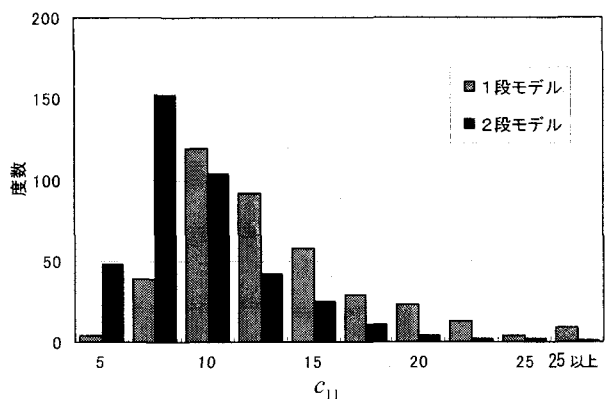


図-9 パラメータのヒストグラム

c_{12} 係数は、非対称分布であるが、2 段モデルのそれは一様分布に近い。 c_{13} 係数については、両モデル共に一様分布を示し、その値の大きさに逆傾向が見られる。(1) 式と (2) 式に示されるように、2 段モデルにおいて、 c_{13} 係数が増加すると、2 段タンクに供給される浸透量が増加することになり、全流出量に占める地下水流出成分が卓越してくる。また、 c_{11} については1 段モデルよりも2 段モデルの方が集中する傾向が見られるが、 c_{12} と c_{13} の標準偏差が大きくなる傾向を示す。

モデル定数解析結果を流域毎に整理して表-3 に示す。その結果、全流域でのモデル定数を用いて総合化するよりも、流域別にモデル定数を総合化し、ハイドログラフの再計算を行った方が、再現精度も向上すると考えられる。

表-3 に示される結果を検討すると、釧路川・網走川流

表-3 流域毎のモデル定数統計量（2段モデル）

水系名	C_{11}		C_{12}		C_{13}		k_{21}		k_{22}	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
釧路川	14.92	4.36	0.19	0.13	4.57	1.58	207.37	128.20	3579.5	2056.2
網走川	10.84	4.34	0.37	0.11	3.77	1.87	209.59	94.86	2965.6	1791.2
渚滑川	7.50	2.76	0.53	0.24	2.32	0.91	80.48	43.98	1225.9	801.6
湧別川	6.76	1.54	0.50	0.19	2.29	0.51	94.31	39.89	1622.2	834.6
常呂川	8.62	3.37	0.42	0.25	2.59	0.76	87.88	51.06	1176.6	907.2
十勝川	9.00	2.80	0.43	0.29	2.55	0.89	89.29	52.87	1219.6	871.0
沙流川	7.24	2.00	0.39	0.22	2.05	0.71	62.92	38.33	928.0	582.1
鶴川	7.29	2.07	0.40	0.15	3.02	1.40	82.89	62.13	790.4	636.7
後志利別川	6.06	1.97	0.55	0.37	2.12	0.66	61.90	43.54	886.9	1014.0
尻別川	8.29	2.50	0.33	0.20	2.99	1.02	117.90	54.31	1661.1	856.8
天塩川	6.99	2.59	0.54	0.31	2.86	1.05	93.02	54.16	1133.9	991.4
石狩川	7.43	2.89	0.34	0.18	2.68	0.94	82.04	44.85	1167.9	1007.4
留萌川	8.09	1.98	0.50	0.21	1.78	0.31	55.09	21.87	988.2	666.2
全流域	8.23	3.49	0.43	0.27	2.62	1.18	93.20	68.17	1335.0	1167.2

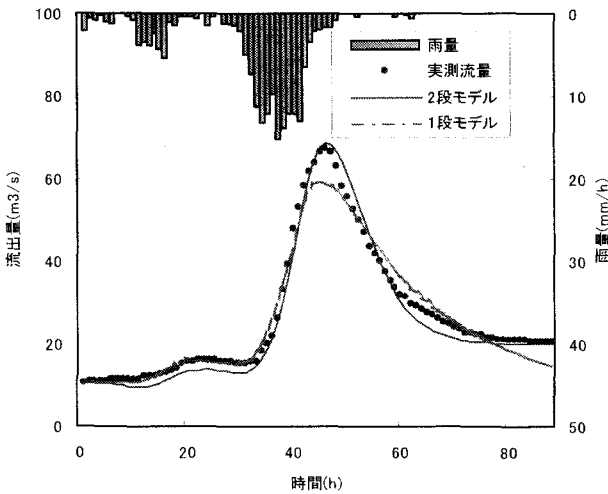


図-10 釧路川水系 釧路川 弟子屈観測所
A=127.8km² 平成4年9月11日洪水

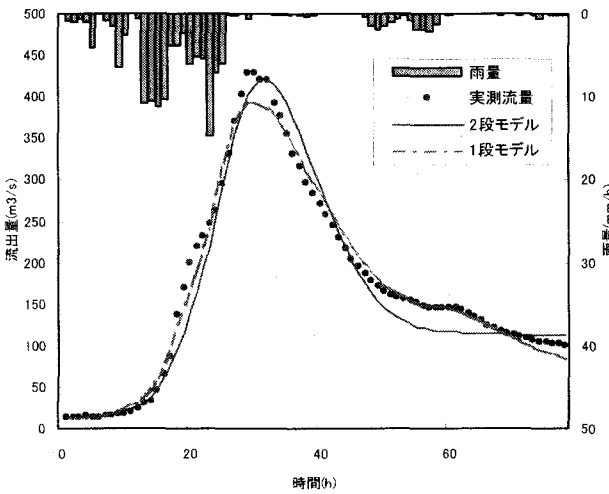


図-11 網走川水系 網走川 美幌観測所
A=824.4km² 平成10年8月29日洪水

表-4 再現精度の結果比較（釧路・網走川）

	J_{PO}		E_O	
	1段モデル	2段モデル	1段モデル	2段モデル
図-10	0.119	0.015	0.0017	0.0012
図-11	0.080	0.021	0.0009	0.0025

域でのパラメータ値およびその標準偏差が、他の流域のそれらと大きく異なることが解る。釧路川・網走川流域は火山灰が広域にわたって分布し、水はけがよく、浸透が大きいという流域固有の特徴を持つ。また、気候特性として、冬期の降雪、夏期の降雨が少ないという特徴もある。一例として、釧路・網走川流域における1段モデルと2段モデルによる計算結果を比較する（図-10、図-11 及び 表-4 を参照）。1段モデルにおいては、とくにピーク流量の再現性がよくない。一方、2段モデルにおいては、流出成分を表面・中間流出成分と地下水流成分

分の2つに分けて表現することで、モデルパラメータにこの流域に固有な特性を反映することができ、その影響がピーク流量の再現向上に寄与していると考えられる。

5. 低水流特性を用いた総合化

釧路川・網走川のように浸透の影響が大きい流域においては、モデル定数の分散が大きいため、洪水毎に土壌特性と流域貯留量が大きく変化していると考えられる。これらの流域においては、パラメータの流域平均値を用いても、ハイドログラフの再現精度低下が予想される。このため、本研究では、出水前の流域湿潤状態を表す指標として、初期流出量を用いる⁵⁾。また、地下水流特性値を表す指標として、渴水流量を採用した。渴水流量は、低水流量観測により得られる値であり、既知の値として利用することができる。本研究では、複数年の平均値を

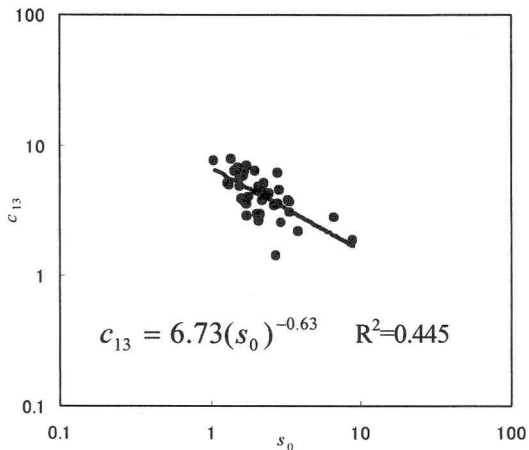


図-12 c_{13} と s_0 の関係

用いている。初期流出量と渇水流量を用いて、(9)式の流域貯留指標を定義して、モデル定数との関係を調べた。

$$\text{流域貯留指標} \quad s_0 = \frac{q_0}{q_s} \quad (9)$$

ここに、 q_0 :初期流出量[m³/s]、 q_s :渇水流量[m³/s]

その一例として、図-12に釧路・網走川流域の c_{13} と s_0 値の相関図を示す。 s_0 値が小さい、すなわち流域貯留量が少ない時、降雨の浸透が大きくなり、浸透度に関係する c_{13} が大きくなる。一方、ある程度流域貯留量が増加してくると、浸透度合いが減少してくる。したがって、流域貯留指標により、流域の貯留度合いが推定できると考え、以後これを用いて、以下のようにパラメータの総合化を図った。なお、 c_{12} と s_0 との相関が小さいので、 c_{12} の値は2つの河川流域の平均値を用いている。

$$\begin{cases} c_{11} = 17.8(s_0)^{-0.35} \\ c_{12} = 0.221 \\ c_{13} = 6.73(s_0)^{-0.63} \end{cases} \quad (10)$$

6. 総合化パラメータによる再現計算

釧路・網走川流域の平均値による総合化パラメータ(1段・2段モデル)と流域貯留指標を用いた総合化パラメータによる再現計算を行う。再現性の評価指標として、(7)式と(8)式を用い、それぞれ、総合化ピーク相対誤差 J_{PS} 、総合化平均2乗ボリューム誤差 E_s とした。その結果を図-13に示す。流域貯留指標を用いた総合化パラメータを用いた場合、最適値を用いた結果に近い事例が多く得られている。とくに、ピーク流量において7以上となる値が大幅に減少していることが解る。

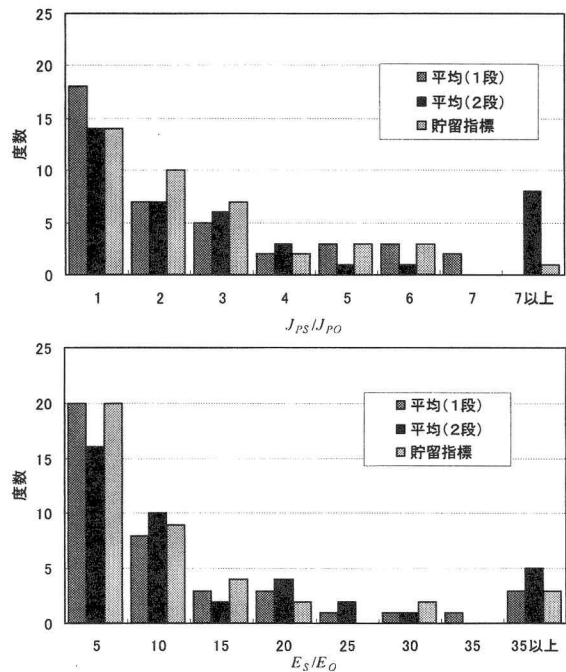


図-13 再現結果の評価(釧路・網走川流域)

7. まとめ

2段タンク型貯留関数法を北海道内の多く洪水事例に適用して、計算ハイドログラフの再現性を検討してきた。その結果、洪水ハイドログラフの再現性が向上し、特にピーク流量の再現が良好となった。また、浸透の大きい流域におけるパラメータの総合化を図る際には、流域内貯留効果の影響を考慮する必要性を指摘した。このため、本研究においては、低水流量特性値と洪水初期流出量を用いて流域内貯留効果を指標化して、パラメータの総合化を図った。その結果、(9)式の指標はモデル定数の総合化に有効であることが検証された。

参考文献

- 1) (財)北海道河川防災研究センター：一般化貯留関数法による流域流出解析・河道洪水追跡実用計算法，2001。
- 2) 園山裕士・星 清・橋本識秀：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。
- 3) 馬場仁志・星 清・橋本識秀：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。
- 4) 高坂圭祐・嵯峨 浩・星 清・橋本識秀：北海道地方における二段タンク型貯留関数モデルによる流出解析，土木学会北海道支部論文報告集，第58号，pp. 340-343，2002。
- 5) 日野幹雄・長谷部正彦：FORTRANとBASICによる水文流出解析，森北出版，1985。

(2002. 4. 15 受付)