

損失機構を組み合わせた 貯留関数モデルの総合化

SYNTHETIC STORAGE ROUTING MODEL COUPLED WITH LOSS MECHANISMS

馬場 仁志¹・星 清²・橋本 識秀³
Hitoshi Baba, Kiyoshi Hoshi and Norihide Hashimoto

¹正会員 開発土木研究所環境水工部 (〒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 (〒060-0061 札幌市中央区南1条西1丁目)

³フェロー会員 工博 北海道工業大学 (〒006-0817 札幌市手稲区前田7条15丁目)

Flood runoff analysis by the storage function models normally requires an estimate of the effective rainfall as an input, which is computed by use of runoff coefficient or filtering of runoff-component separations. The present study proposes a new storage routing model which can accommodate a nonlinear relationship between the storage and discharge as well as loss mechanisms.

The model can calculate the total hydrograph from the observed rainfall instead of using the effective rainfall. The loss mechanisms take into account infiltration, evaporation and transpiration from the river basin. An unknown parameter of the loss component is identified at the same time as the other parameters involved in the storage function model. The proposed model has the advantage of the real-time flood forecasting, because the hydrologic data are directly processed.

The model developed in this study was applied to more than 70 flood records from the rivers in Hokkaido. The Newton-Raphson method was used to optimize the model parameters in which the sensitivity coefficients were theoretically derived and the technique of the lower triangular Cholesky factorization was employed to search the optimized values as fast as possible. The results clearly show that the proposed model appears to provide better reproduction of the hydrograph than the hydrograph of effective rainfall patterns is used.

Key Words : Flood runoff, Synthesis of storage routing model, Rainfall loss, Optimization

1. はじめに

貯留関数法は降雨流出現象の非線形性を簡単な構造式で表現でき、比較的計算が簡便なことから、とくに洪水流出解析に多用されてきている。しかしながら、貯留関数法を実際の流出解析に適用する際の難点として、有効雨量の算定が挙げられる。一般的には、直接流出量と基底流出量の分離後の操作、たとえば、流出率の算定などにより、有効雨量が計算される。計算流出成分の分離手法も確定的なものではなく、事前処理の手法によっては、直接流出高も微妙に異なるデータとなり、流出解析の結果にも影響を及ぼす。

永井ら^{1,2)}は、洪水到達時間式、表面流モデルおよび貯留関数モデルに関して、流出モデル間の相互関係を整理している。さらに、タンクモデルと貯留関数法との相互関係を議論している³⁾が、貯留関数法にはタンクモデ

ルから推定された有効雨量を与えている。

最近、貯留関数法に損失機構を組み込んだモデル開発が提案されている^{4,5)}。この手法においては、入力系に実績雨量を直接用いるため、有効雨量の推定を必要としない。また、総流出高をそのまま用いるため、直接流出高の分離作業を必要としない。

本論文では、貯留量と流量の関係の二価性と非線形性を考慮し、損失機構を組み入れた貯留関数モデルを作成している。このモデルを北海道内の石狩川を中心とした既往洪水データに適用し、最適モデル定数を用いて総合貯留関数法の構築を試みたものである。

2. 研究目的

従来から、流出解析においては観測雨量に対して有効雨量を定義し、これらの差を無効あるいは損失成分と

して分離している。この手法は、解析結果の実データへの適合性を高める上でも有効な手段である。

一方、流出量についても、長期的な基底流出成分と短期的な直接流出成分を仮定し、フィルター分離などの作業により直接流出高を算出している。

貯留関数法による流出解析では、これら雨量および流出高の事前調整の差異により、モデル定数が大きく変化するかもしれない。その結果、総合貯留関数法の安定性およびモデルパラメータの信頼性に限界をきたす原因ともなっている。

とくに、実時間洪水予測においては、有効雨量と直接流出高のリアルタイム分離作業はほとんど不可能と言っても過言ではない。

本研究の目的は、観測雨量および観測流出高を直接処理可能な総合化貯留関数モデルを構築し、上記の問題を克服しようとするものである。

本論文では、モデルの構築、実測データへの適用、適合性の評価、パラメータの一般化、貯留関数法の総合化の手順に沿って議論を進める。

解析に用いた洪水資料は、北海道開発局が北海道内の一級河川流域およびその支川流域で観測した時間雨量と時間流量であり、流量の算定には水位～流量曲線を用いた。

3. モデルの構築

有効雨量を用いた貯留関数法では、以下の非線形二価関数モデルが実現象との適合性において優れていることが明らかにされている。

s_e = k_{1e} q_e^{p_1} + k_{2e} \frac{d}{dt} (q_e^{p_2}) \tag{1}

\frac{ds_e}{dt} = r_e - q_e \tag{2}

ここに、s_e : 有効雨量に対する貯留高(mm)、q_e : 直接流出高(mm/h)、r : 観測雨量(mm/h)、r_e : 有効雨量(r_e = f \cdot r, f : 流出率)、k_{1e}, k_{2e}, p_1, p_2 : モデルパラメータである。

星ら⁶⁾は、降雨流出過程を代表する分布定数系モデルであるKinematic wave法を理論的に貯留関数法に集中化し、次のようにk_{1e}およびk_{2e}の総合化を行っている。

k_{1e} = 2.823(n/\sqrt{i})^{0.6} A^{0.24} \tag{3}

k_{2e} = 0.2835 k_{1e}^2 \bar{r_e}^{-0.2648} \tag{4}

ここに、n : 等価粗度、i : 平均斜面勾配、\bar{r_e} : 平均有効雨量強度である。

星ら⁷⁾は北海道内の主要洪水例をもとに同定した結果に、永井ら⁸⁾の計算結果を加えて、(n/\sqrt{i})^{0.6}の値として、平均値\mu=1.564、分散\sigma^2=0.430を得ている⁸⁾。これを(3)式に代入すると、(5)式のように表現される。

k_{1e} = \begin{cases} 2.56A^{0.24} & (\mu - \sigma) \\ 4.42A^{0.24} & (\mu) \\ 6.27A^{0.24} & (\mu + \sigma) \end{cases} \tag{5}

損失項を導入した貯留関数法は、(2)式においてr_eに代えてrを直接用い、直接流出高q_eを総流出高qに代えるとともに損失項-pを加えることで構築する。

s = k_1 q^{p_1} + k_2 \frac{d}{dt} (q^{p_2}) \tag{6}

\frac{ds}{dt} = r - q - p \tag{7}

p = \alpha q \tag{8}

(2)式と比較すると、(7)式は連続式に対する調整、インプット側からアウトプット側に変更したものと言える。また、損失項の物理的特性は不飽和浸透流理論から導かれるものであり、八田ら⁹⁾は損失を含めた不飽和浸透理論を集中化することにより貯留型流出モデルを誘導している。

p (損失高, mm/h)については、実現象において蒸発散・浸透・森林内の葉面貯留などが含まれる。損失項を表現する関数形には、貯留高に比例する式を導入することも考えられるが、線形の場合は流出高に比例する式を用いても差はないと考えられる。実際に、筆者らのこれまでの研究^{5, 10)}では、流出高に比例する線形項を導入することにより良好な結果を得ているので、本研究においても(8)式を用いた。なお、初期損失雨量も(8)式に含まれると考え、観測雨量の分離は行わない。

4. 実測データへの適用

解析に用いた水文データの概要を表-1に示す。主として、石狩川における昭和50年および昭和56年の洪水時に観測された基準点の洪水資料であり、その他に石狩川の3次支川である豊平川上流域の砂防河川における最近の洪水データなども用いた。

表 - 1 解析に用いた洪水資料

河川名	洪水期間	観測所名
石狩川	1981/8/3-5	奥芦別ダム、雨竜第1ダム、雨竜第2ダム、大夕張ダム、伊納、旭橋、永山、中愛別、曉橋、江卸発電所、西神楽、西一区、布部、桜岡、留辺蕊、石狩大橋、岩見沢大橋、月形大橋、奈井江大橋、橋本町、妹背牛、納内、西川向、清幌橋、円山、赤平、雨竜橋、多度志、幌加内、大鳳橋、雁来、石山
石狩川	1975/8/22-25	大雪ダム、豊平峡ダム、桂沢ダム、金山ダム、鷹泊ダム、野花南ダム、大夕張ダム、砥山ダム
鶴川	1992/8/9-10	穂別
輪厚川	1972-1986	輪厚(13)
豊平川	1996/9/18	定山溪流出試験地(開発土木研究所)
豊平川	1994-1996	穴の川(7)、オカバルシ(7)、野の沢(7)

() 内の数字は洪水例の数

モデルパラメータは、 k_1, k_2, p_1, p_2 に加えて α の計5個である。有効雨量を用いた(1)式の貯留方程式においては、表面流にマニング則を想定する場合、 $p_1 = 0.6, p_2 = 0.465$ となることが明らかにされているため⁶⁾、本研究では k_1, k_2, α の3個のモデル定数を同定することとした。パラメータの最適化手法は、理論的に導出される感度係数と成分回帰分析法¹²⁾を併用したニュートン法によった。

流域面積の大きさの差異による大・中・小流域における代表的な適用例を図-1から図-4に示した。

解析結果によれば、流域面積の違いに依らず計算ハイドログラフの実測ハイドログラフへの適合度は良好である。平沢ら¹⁰⁾は、同洪水データを用いて、観測雨量に流出率を乗じて有効雨量を算出した従来のモデルと損失成分をモデル化した貯留関数法を比較している。その結果、後者のモデルによる方が実測値と計算値との誤差が小さいことを明らかにしている。

図-5に実績ピーク流出高と計算ピーク流出高を比較して示す。大きい洪水例において、計算値が実測値を上回るケースも見られるが、これは安全側であり、しかもほとんどの洪水例においてピーク値の再現性は良好であると言える。

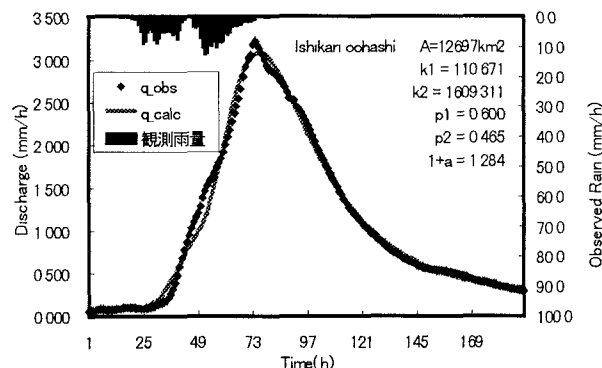


図-1 解析事例
(大流域: 石狩川、石狩大橋、 $A=12,697\text{km}^2$)

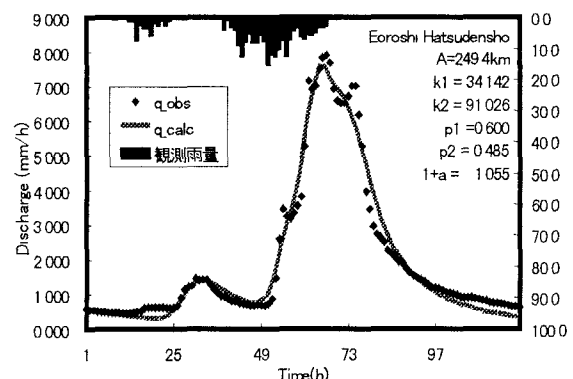


図-2 解析事例
(中流域: 忠別川、江卸発電所、 $A=249.4\text{km}^2$)

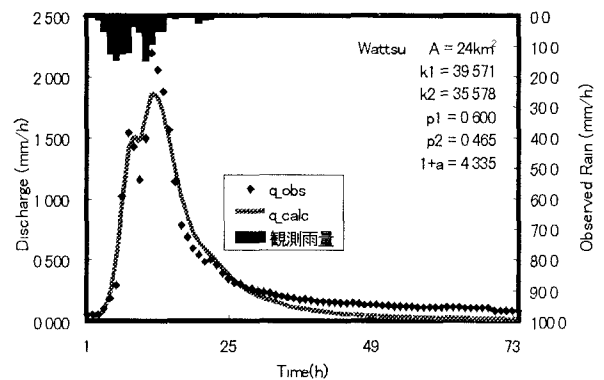


図-3 解析事例
(小流域: 輪厚川、輪厚、 $A=24\text{km}^2$)

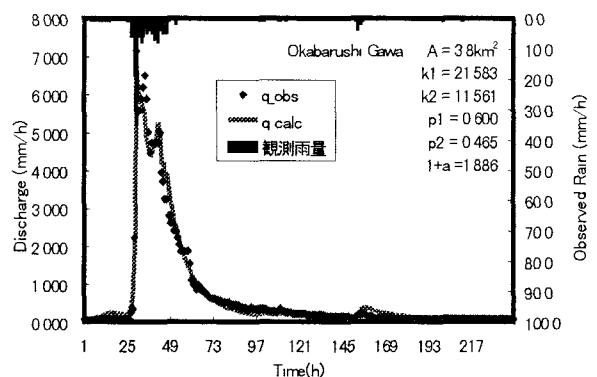


図-4 解析事例
(小流域: 豊平川支流、オカバルシ川、 $A=3.8\text{km}^2$)

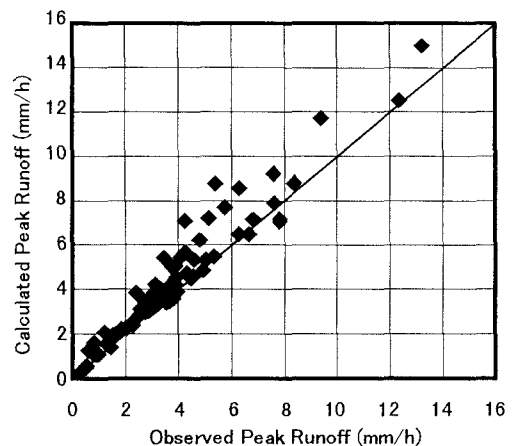


図-5 計算・実績ピーク流出高の比較

5. 総合化貯留関数モデル

貯留関数法の総合化を図るため、最適化パラメータと流域特性値および降雨特性値との相互関係を統計的に処理した。

モデル定数 k_1 と流域面積 A の関係を図-6に示す。最小二乗法による近似式として、(9)式の関係式が得られた。なお、 A のべき乗数0.24は、(3)式との物理的な意味を保持するために固定した。

$$k_1 = 11.62A^{0.24} \quad (9)$$

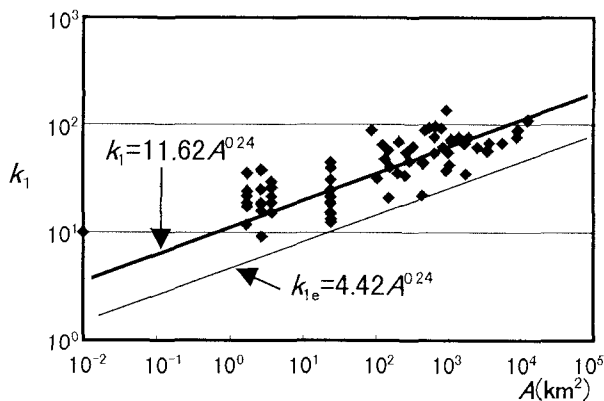


図 - 6 k_1 と流域面積との関係

図 - 6には有効雨量を用いた総合貯留関数法による(5)式の関係式、 $k_{1e} = 4.42 A^{0.24}$ も併記してある。従来の貯留関数法と損失項を考慮したモデルとの結果を比較すると、実績雨量と総流出量を直接用いた貯留係数の方が、有効雨量と直接流出量を用いたそれよりも、係数が2～3倍大きい。このことは、解析に用いた洪水例の流出率が概ね1/2～1/3の範囲にあることと符合する。なお、(5)式および図 - 6に示すとおり、 k_1 のばらつきの程度は両者ともほぼ同じである。

k_2 と k_1^2 の関係式は図 - 7に示されている。(4)式との整合性を保持するために、 k_1 のべき乗数を2に固定して、最小二乗法によって決定された関係式が(10)式である。なお、 k_1 のべき乗数を2に固定しない場合は、 $k_2 = 0.1292 k_1^{1.709}$ となる。

$$k_2 = 0.0593 k_1^2 \quad (10)$$

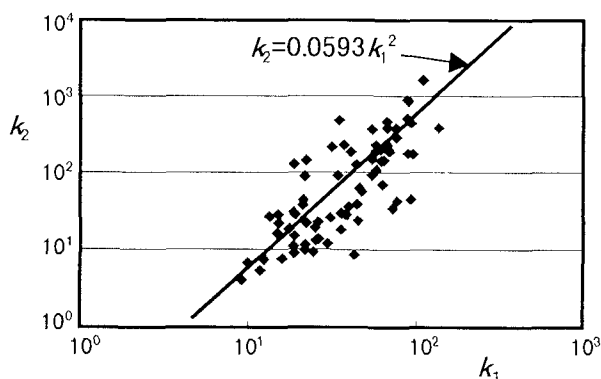


図 - 7 k_1 と k_2 の関係

(4)式に示されるように、モデル定数 k_2 を k_1 と平均雨量強度の関数で表現する方法も考えられる。このため、同一観測所において複数の洪水例を対象に流出解析を行い、平均雨量強度を勘案した関係式を導いた。その一例として、輪厚川流域における雨量強度の異なる洪水例を解析対象とした相関図が図 - 8に示され、関係式は(11)式で与えられる。

$$k_2 = 0.1706 k_1^2 \bar{r}^{-0.8235} \quad (11)$$

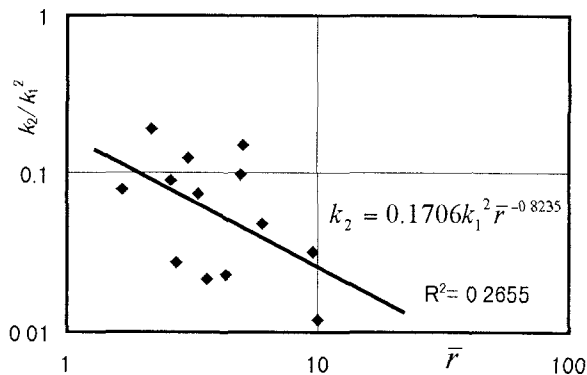


図 - 8 k_2 と平均雨量強度との関係

モデル定数 k_2 の総合化を(10)式の k_1 のみによる場合と(11)式の平均雨量強度を含めた場合について行った。(10)式は、洪水逐次予測(operational forecast)に有利である。リアルタイムという実際上の問題を考えた場合、不確定性の大きい「平均雨量強度」は避けた方が得策であるからである。一方、(11)式は計画降雨規模を考慮できることから、洪水計画予測(design forecast)に有利である。

損失項 α の値と、有効雨量の算定に用いた初期損失を考慮しない総流出率 f 、および直接流出高との対応関係を明確にする必要がある。今、 β = 直接流出高 / 総流出高と置くと、(2)式は次のように変換できる。

$$\frac{ds_e}{dt} = fr - \beta q \quad (12)$$

一方、(7)式の s は観測降雨に対する貯留であり、(7)式の両辺に f を乗じたものが(12)式と等価であることから、両式を整理して(13)式を得る。

$$\frac{1}{1 + \alpha} = \frac{f}{\beta} \quad (13)$$

したがって、損失項の係数 α は、有効雨量および直接流出高の算定に用いた f および β と陽形式で表現できたことになる。

図 - 9は最適値 α と有効雨量および直接流出高を算出する際に用いた f と β の関係を示したものである。なお、 β は本来、時刻とともに変化する値であるが、ここでは、一洪水における基底流出量を除いた総直接流出量を総流出量で除した一定値を用いた。また、基底流出量のカットには、フィルター分離法等が提案されているが、ここでは、もっとも一般的と考えられる片対数紙上でハイドログラフの立ち上がり点と減衰部第2折点を結ぶ線で基底流出量を分離する手法によった。

本論文で提案したモデルの損失係数 α 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、本提案モデルによっても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。

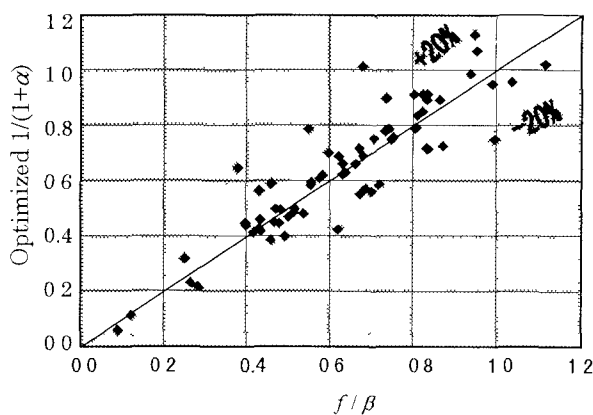


図 - 9 $1/(1+\alpha)$ と f/β の関係

(13)式の右辺において、 β を総直接流出量の総流出量に対する割合を一定とすれば、(13)式は次式のように近似できる。

$$\frac{1}{1+\alpha} = \frac{f}{\beta} \cong \frac{Q}{R} \quad (14)$$

ここに、 Q : 総流出量、 R : 総降雨量である。

(14)式は提案モデルの実用的な特長を示している。すなわち、直接流出量の分離および有効雨量の算出を行わなくとも、観測水文資料から損失係数 α を推定でき、これを貯留関数モデルに容易に組み込むことができることを意味している。

図 - 9に示すように、損失係数 α は(14)式だけでは完全に記述できないと考えられる。このため、損失に影響を及ぼしていると想定される流域特性値を(14)式に加味する。損失に寄与する要因は、以下の要素に大別される。すなわち、

蒸発散：蒸発散に強く影響する流域特性は、主として植生・地被状態および大気の状態（湿度、風速など）であり、季節変動が大きい。

浸透：浸透に影響する流域特性は、主として植生・地被状態であり、長期的・広域的には地質・地形も含まれる。季節変動は比較的小さい。

その他の損失：この損失には林内貯留、生物による消費、利水による水消費が含まれる。

損失の大きさを左右する要因として、上記のすべての損失項目に影響を与えているものは、土地利用状況の違いなどによる流域の地被状態である。

以上の議論から、損失を規定する流域特性を単純化したモデルを作成するために、地被状態をパラメタライズした項を(14)式に導入し、次式を定義した。

$$\begin{cases} \frac{1}{1+\alpha} = \phi_0 \frac{Q}{R} + E \\ E = \phi_A L_A + \phi_B L_B + \phi_C L_C + \phi_D L_D \end{cases} \quad (15)$$

ここに、 L_A, L_B, L_C, L_D は、流域内の地被区分を以下に示す4分類で計測し、それぞれAからDまでの区分毎の地被区分を占有面積率で表したものである。また、

$\phi_A, \phi_B, \phi_C, \phi_D$ は各地被区分の重み係数である。 ϕ_0 は Q/R にかかる重み係数であり、地被区分にかかる係数との寄与度を比較するために設けた。なお、 $\phi_A, \phi_B, \phi_C, \phi_D$ の合計値が1であるため、(15)式に定数項は無い。

A) 損失の大きい区域：森林、ササ群落(地被分類コード1~108)

B) 貯留の小さな流域：畑地、放牧地、雑草群落、自然裸地、ゴルフ場(109~113, 124)

C) 損失の小さい区域：住宅地、市街地、飛行場、工場地帯、造成地(114, 119~122)

D) 貯留の大きい区域：水田(115)、開放水域(123)

用いたデータは石狩川流域ランドスケープ情報¹¹⁾に収録されている3次メッシュの地被分類である。上記の情報は、昭和54、58-61年調査の環境庁発行の現存植生図をもとに作成されており、解析に用いた洪水記録と同時期のものである。

解析にあたっては、流域固有の特性値以外の影響因子による変動、すなわち、季節的な変動や湿潤・乾燥状態の違いによる蒸発散の影響を除外する必要がある。このため、同一期間の一連降雨におけるデータを解析対象とし、1981年8月の石狩川における洪水データ（27単元流域）を用いた。

上記の出水例は既往洪水のうち、水理記録が十分に得られることから、モデル定数の総合化には最適であると考えられる。しかしながら、本研究では、大気の状態および季節変動は考慮しないため、異なる季節の気象条件や流域状態のもとでの最適化の検討が今後必要となる。

(15)式の重回帰分析は成分回帰分析手法によって行った¹²⁾。各重み係数、標準誤差および寄与度を表 - 2に示す。なお、重相関係数は0.911であった。

表 - 2 成分回帰分析結果

	重み係数	標準誤差	寄与度 (標準偏回帰係数)
Q/R	$\phi_0 = 0.9277$	0.1098	0.8959
森林	$\phi_A = 0.0633$	0.0670	0.0434
畑地など	$\phi_B = 0.0920$	0.2163	0.0395
市街地	$\phi_C = 1.2451$	1.0281	0.1131
水田・水域	$\phi_D = -0.0264$	0.3228	-0.0101

表 - 2の結果によれば、 α の値は Q/R によってほとんど決定されており、ついで、市街地の割合が α の増減に寄与する度合いが大きい。畑地・放牧地や森林域の寄与度は小さい。水田や水域などは、ほとんど寄与していない。市街地面積率の重み係数は大きく、損失係数 α の低下に寄与しているが、標準誤差も比較的大きい。

図 - 10には最適値 α と(15)式の回帰式による近似値の関係を示す。 α の値が1.3を上回る場合を除いて、(15)式の近似式による推定精度は高いことが分かる。

リアルタイムの洪水予測では、 Q と R をそれぞれ、現時刻までの累加流出量および累加降雨量で置き換え、 α の推定に Q/R を用いれば実用性も高くなると考える。

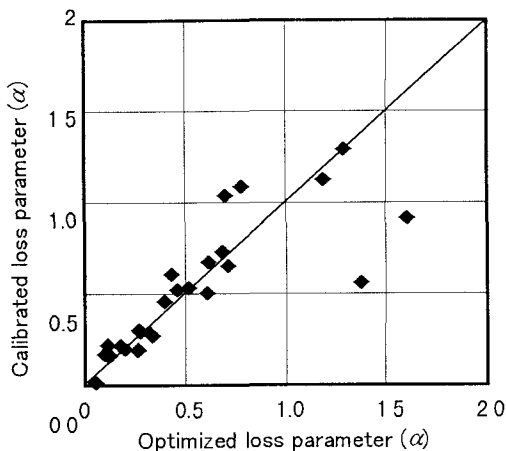


図 - 10 損失係数 α の最適値と近似値の関係

6. 考察

貯留関数法への入力が有効雨量であるか、観測雨量であるかの違いによって、モデル定数の値が大きく変化する。損失機構を導入した貯留関数法においては、パラメータ k_1 の値が有効雨量を用いたモデルより大きくなっている。Kinematic wave法を貯留関数法に集中化した後、表面流がマニング則に従うものとするれば、パラメータ k_{1e} は(3)式で与えられる。すなわち、有効雨量が入力の場合、 $(n/\sqrt{I})^{0.6}$ の値が小さければ小さい程、直接流出量のピークは大きくなり、ピーク到達時刻は早まる。

一方、観測雨量を直接入力する場合、損失量 αq に観測雨量の一部が消費され、有効雨量に見合うだけの直接流出量を補償するためには、 $(n/\sqrt{I})^{0.6}$ の値は見かけ上、大きく設定されることになる。

有効雨量を用いた流出計算では、貯留関数法のモデルパラメータは有効雨量のみに対して貯留量を規定していたことになる。しかしながら、カットされた降雨の中には蒸発散、浸透、その他の損失が含まれており、実際にはこれらの損失項も貯留量に影響を及ぼしている。

損失機構を考慮した貯留関数モデルにおいては、全雨量が貯留量と損失量に配分されるので、有効雨量を用いたモデルの欠点は改良されたことになる。また従来から、直接流出量の算出、すなわち基底流出量の分離手法の違いによって、解析結果が大きく異なることも多かったが、本提案モデルでは、パラメータをより客観的に評価できるようになった。筆者らは、この利点を応用して、流域の都市化に伴う貯留関数モデルパラメータの経年変動特性を明らかにしている¹³⁾。

7. おわりに

本研究では、降雨流出過程に内在する種々の損失を一個のパラメータで集中化し、これを貯留関数法に組み込んだ。損失高を決める定数 α を一定とし、この値を観

測水文資料および地被状態パラメータを用いて推定する方法を提案した。 α のオンライン同定も可能である。また、不飽和浸透流を含むモデルへ発展させることも可能であり、脱水時には浸透しやすく、湿潤時には浸透しにくいというヒステリシス効果を導入することができる。

嵯峨ら¹⁴⁾は2段貯留関数モデルに損失機構を導入し、より精度の高い流出解析が行えるとしている。今回開発したモデルによる結果と予備的に比較した結果、洪水ピークに大きな差異は見られないことが分かった。したがって、本研究で提案した簡易な1段貯留関数モデルでも、水文資料の少ない流域における流出予測に実用上十分な精度を持って、適用可能であると考えられる。

今後の課題として、石狩川の洪水資料から得られた貯留関数モデル定数の総合化結果を他の河川流域にも拡張して、モデルの普遍化を図る必要がある。

参考文献

- 1) 永井明博、角屋 睦、杉山博信、鈴木克英：貯留関数法の総合化、京都大学防災研究所年報、第25号B-2, pp. 207-220, 1982
- 2) 永井明博、四方田穆、奥谷順彦：洪水流出モデル定数の相互関係、農業土木学会論文集No. 129, pp. 69-76, 1987
- 3) 永井明博：洪水流出タンクモデルの総合化に向けて、農業土木学会論文集No. 176, pp. 95-103, 1995
- 4) 田中敦、藤田睦博、清水康行：損失機構を含む貯留関数法に関する研究、土木学会北海道支部論文報告集第53号(B), pp. 54-59, 1997
- 5) 馬場仁志、星 清：損失機構を取り入れた総合貯留関数法の試み、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集第2部, pp. 316-317, 1997
- 6) 星 清、山岡勲：雨水流法と貯留関数法との相互関係、第26回水理講演会論文集, pp. 273-278, 1982
- 7) 星 清、村上泰啓：小流域における総合貯留関数法の開発、第31回水理講演会論文集, pp. 107-112, 1987
- 8) 北海道開発局土木試験所河川研究室：実用的な洪水流出計算法, 185p. 1987
- 9) 八田茂美、藤田睦博、山梨光訓：不飽和浸透理論に基づく流出解析の実用化に関する研究、土木学会北海道支部論文報告集第54号(B), pp. 58-61, 1998
- 10) 平澤陽一、馬場仁志、星 清：損失を考慮した貯留関数のパラメータ総合化、土木学会北海道支部論文報告集第54号(B), pp. 34-37, 1998
- 11) 北海道開発局建設部河川計画課 監修：石狩川流域ランドスケープ情報、北海道河川防災研究センター, 24p., 1997
- 12) 星 清：成分回帰分析手法、北海道開発局土木試験所月報No. 397, pp. 21-26, 1986
- 13) 佐々木靖博、平澤陽一、馬場仁志：輪厚川における流出特性の変化、土木学会北海道支部論文報告集第54号(B), pp. 38-43, 1998
- 14) Saga, H., Hoshu, K. and Hashimoto, N. A New Tank Model Coupled with the Storage Routing Method, Proc. of the XX Nordic Hydrological Conference, Vol. II, pp. 605-614, 1998

(1998. 9. 30受付)