

蒸発散を組み合わせた 二段型貯留関数モデルの提案

INTRODUCTION OF TWO-STEP STORAGE ROUTING MODEL COUPLED WITH EVAPO-TRANSPIRATION

馬場 仁志¹・星 清²
Hitoshi BABA and Kiyoshi HOSHI

¹正会員 国土交通省北海道開発局石狩川開発建設部千歳川河川事務所 (〒066-0026 千歳市住吉1丁目1-1)

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)

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 separations of runoff-component. The previous study proposed a storage routing model coupled with the loss mechanism, which can calculate the total hydrograph from the observed rainfall instead of using the effective rainfall. The model can accommodate a nonlinear relationship between the storage and discharge.

This study introduces the two-step storage function model in which the first storage function regulates the surface flow while the second regulates the returning flow from the infiltration through the ground. The model also regulates the evapo-transpiration as a proportion derived from the method of meteorological estimation. Infiltration and evapo-transpiration of the watershed are modeled separately from the loss mechanisms of the previous model.

The model developed in this study was applied to 1998's flood records from the rivers in Hokkaido, Japan. The results clearly show that the proposed model appears to provide better reproduction of the hydrograph than the previous single storage routine model.

The proposed model is helpful for the runoff separation estimation. The model is also useful for long-term runoff analysis and quantifiable estimation of watershed's storage. Five model parameters, which are indicative of the hydrological characteristics of the watershed, are easily calculated by the Newton-Raphson method.

Key Words : Flood runoff, Storage routing model, Infiltration, Evapo-Transpiration,

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。

貯留関数法を実際の流出解析に適用する際には、一般的には流出率の算定などにより、有効雨量を計算し、これをインプットとして与えている。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事前に算出している。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有効な手段である。

しかし、流出成分の分離手法によっては、直接流出高も微妙に異なるデータとなり、有効雨量の算定方法によっても流出解析の結果に影響が及ぶ。

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。

貯留関数法に損失機構を組み込む考え方^{4,5)}では、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。

馬場ら⁶⁾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た。八田ら⁷⁾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おり、馬場らが提案したモデルの物理的意味が明らかにされた。

佐藤ら⁸⁾は、二段型タンクモデルに非線形貯留関数を

導入する考え方を発表し、実データとの適合性が優れていることを示した。

損失機構を導入した貯留関数モデルは、雨量および流出高の事前調整を行わないため、モデルパラメータの客観性、安定性が確保され、実時間洪水予測への応用に有利な特性がある。

しかし、長期流出資料の解析においては、ハイドログラフ低減部の再現性に不十分なところがあった。これは、損失項に含まれる地下への浸透損失成分が再び表面流に戻る過程、すなわち遅れた流出現象を考慮していないために、洪水後の長期解析において再現性を損ねているためであると考えられる。

また損失に含まれる蒸発散は浸透損失とともに集約して扱われており、物理的な意味が不明確な部分を残していた。

そこで本論文では、長期的水文データへの適用性を考慮し、浸透損失成分の復帰を考慮したモデルへと発展させるとともに、蒸発散による損失を分離してモデルに組み入れる。

当モデルは、損失機構を導入した一段貯留関数モデルの特徴を受け継ぎながら、さらに実データへの適合性を高め、非洪水期を含む長期的な実時間流出予測や流出成分分離計算などへと、応用範囲を広げるものである。

ここに、モデルの構築、実測データへの適用、再現性の評価、蒸発散の組み込み効果、さらにモデルの応用に沿って議論を進める。

2. モデルの構築

損失機構を導入した貯留関数モデルは、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、次のように表現される。

$$s_1 = k_{11} q_1^{p_1} + k_{12} \frac{d}{dt} (q_1^{p_2}) \quad (1)$$

$$\frac{ds_1}{dt} = r - q_1 - l_1 \quad (2)$$

$$l_1 = \alpha q_1 \quad (3)$$

ここに、 s_1 :貯留高(mm)、 q_1 :流出高(mm/h)、 r :降水量(mm/h)、 l_1 :損失高(mm)、 $k_{11}, k_{12}, p_1, p_2, \alpha$:モデルパラメータである。

馬場ら⁸⁾は、北海道内の主要洪水例をもとにパラメータの総合化を行い、次のように表現している。なお、表面流はマニング則に従うとする仮定から、 $p_1 = 0.6$, $p_2 = 0.465$ に定数化されている。

$$k_{11} = 11.62 A^{0.24} \quad (4)$$

$$k_{12} = 0.0593 k_{11}^2 \quad (5)$$

l_1 (損失高, mm/h)については、森林内の遮断蒸発、植物の呼吸作用に起因する蒸散、地下への浸透損失が含まれる。

いま、損失高のうち浸透成分が地中の浸透層を経て表面流に戻る成分を q_2 、表面流に戻らない損失成分を l_2 とし、 q_2 の貯留関数をダルシー則から集中化して導かれる線形二価の形で(6)式に、連続式を(7)式に定義する。

$$s_2 = k_{21} q_2 + k_{22} \frac{dq_2}{dt} \quad (6)$$

$$\frac{ds_2}{dt} = l_1 - q_2 - l_2 \quad (7)$$

この貯留関数が地下浸透を経て河川に流出する遅い流出成分を定義することから、 q_2 を二次流出と呼ぶことにする。対して、表面流モデルを集中化した(1)式で表される早い流出成分 q_1 を一次流出と定義する。同様の表現で s_1 を一次貯留、 s_2 を二次貯留と呼ぶこととする。河川流出 q は次のように表される。

$$q = q_1 + q_2 \quad (8)$$

二次流出からの損失 l_2 の内容は、 e :蒸発散による損失、 g :流量観測地点に復帰しない深地層への浸透損失から構成される。

$$l_2 = e + g \quad (9)$$

蒸発散量 e は、流域の植生被覆状態に応じて気象データをもとに熱収支モデルから計算される蒸発散フラックスを導入する。深地層への浸透損失量 g については、流域の地質構造等によって定まるものと考えられるが、流量観測地点より上流域の浸透と湧出が長期的には等しいと考えれば無視することができる。

佐藤ら⁹⁾のモデルでは、(9)式に相当する式を二次流出高に比例する関数($l_2 = \alpha_2 q_2$)として定義していたが、パラメータの増加を避けるとともに、物理性がより明確なモデルにするため、本モデルでは蒸発散を組み入れた。

モデルパラメータは $p_1, p_2, k_{11}, k_{12}, k_{21}, k_{22}, \alpha$ の7個である。このうち p_1, p_2 は一次流出の特性を決める表面流のモデルパラメータであり、前記の定数(0.6および0.4648)を用いる。他のパラメータについては、表面流・浸透流の理論によって流域および斜面の性状をもとに設定する方法も考えられるが、等価粗度や透水係数といった設定レンジの極めて広い係数を含んでいるために、流域特性値として設定することは困難である。したがって、一般的には観測流出高をもとにパラメータの最適化を行う。本研究では、ニュートン法⁹⁾を用いてパラメータの最適化を行った。

蒸発散量 e については、ソーンスウェイトの式やハモンの式などの気温のみを用いる方法や、群落の空気力学的抵抗を考慮したペンマン-モンティースの式¹⁰⁾を用いる方法などがあるが、流出解析への応用性を考慮すると土地被覆や植生情報を反映できる方法が望ましい。

本研究では群落の気孔抵抗と葉面積指数から蒸散を計算するペンマン-モンティースの簡略式¹¹⁾を用いることとした。同式は、気温、気圧、相対湿度、および植生群落のパラメータで次のように表現される。

$$\lambda e = \frac{\rho C_p}{\gamma} \cdot (e_s(T_a) - e_a) \cdot \frac{LAI}{\tilde{r}_s} \quad (10)$$

ここに、 λ :蒸発潜熱(kcal), e :蒸発散量(mm/h), ρ :空気の密度(kg/m³), C_p :空気の定圧比熱(KJ/kg・K), γ :乾湿計定数, T_a :気温(°C), $e_s(T_a)$:気温 T_a における飽和水蒸気圧(hPa), e_a :空気の水蒸気圧(hPa), $\tilde{r}_s$:群落の気孔抵抗(sm⁻¹), LAI :葉面積指数である。

3. 実測データへの適用

解析に用いた水文資料は、北海道東部に位置し、オホーツク海に注ぐ一級水系網走川、常呂川、湧別川の3流域内4か所の水位・流量観測所で1998年8、9月に観測された毎時データ2か月分である。この期間内には、8月末から9月上旬にかけて2回の洪水が観測されており、当地域としては既往最大規模の洪水災害が発生している。

流量の算定には水位～流量曲線を用いた。時間雨量は北海道開発局およびアメダスのデータを用い、ティーセン法により各流量観測地点基準の流域平均時間雨量を求めた。蒸発散量の算定に必要な気温、相対湿度、気圧は、網走管区気象台による網走観測所の毎時観測値を用いた。

(10)式を用いた蒸発散量の計算には、群落の蒸散抵抗を表す $LAI/\tilde{r}_s$ の推定が必要である。この値は、流域内植生分布及び土地利用に影響を受けるとともに季節変動をとともなう。ここでは佐渡ら¹²⁾が求めた常呂川の月別蒸発散量平均値を用いて $LAI/\tilde{r}_s$ の値を推定した。

図1は、上記の月別蒸発散量平均値のグラフに、1998年8月および9月の気象データを(10)式に代入して計算される葉面積指数別月蒸発散量を重ねて示したものである。8月から9月にかけては急激に蒸発散量が低減する時期であり、各月の平均値に最も近い計算結果が得られる $LAI/\tilde{r}_s$ の値は0.015(8月)および0.006(9月)となった。計算された8～9月の蒸発散量合計は129mmである。

以上の水文データをもとに流出計算を行った。まず、湧別川・開盛観測所における提案モデルによる流量観測値の再現結果を、一段型貯留関数モデルで解析した結果

と比較した(図2)。その結果、特に低水流出部分と洪水終息部で大幅に再現性が改善されており、洪水ピーク部分の精度向上もみられる。

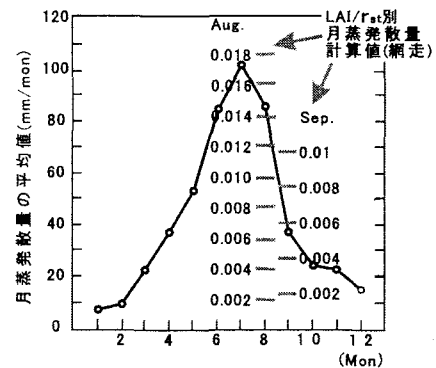


図1 常呂川の月別蒸発散量平均値(原図:佐渡・根田, 1994)と、葉面積指数の違いによる網走地方9月の蒸発散量との比較

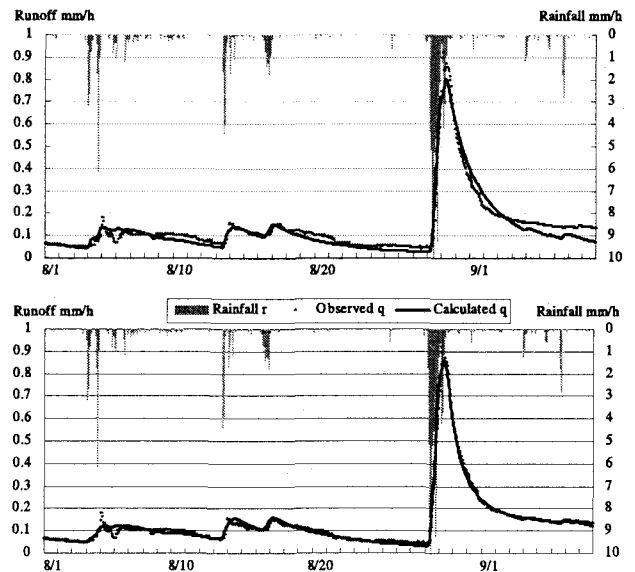


図2 二次流出および蒸発散を含まない損失機構導入モデル(上)と本モデル(下)の再現性比較(湧別川、開盛観測所、 $A=1334.8\text{km}^2$)

次に、流域面積が異なる3ヶ所の流量観測値の再現結果を、一次・二次貯留高の変化とともに図3から図5に示した。いずれの結果も観測値の再現性は良好である。一次・二次流出成分の分離結果によると、流域面積が小さいほど二次流出成分の割合が大きくなっている。これは、降雨流出過程を斜面系流出と河道系流出に分類した場合、集水面積が小さいときに斜面系流出が卓越するという既往研究成果¹³⁾と同様のスケール効果である。すなわち本研究に置き換えると、流域面積の大小に関係なく浸透流出層の厚さがほぼ同等と仮定すれば、流域面積が小さいほど二次流出成分が卓越するはずであり、解析結果はこれを裏付けている。

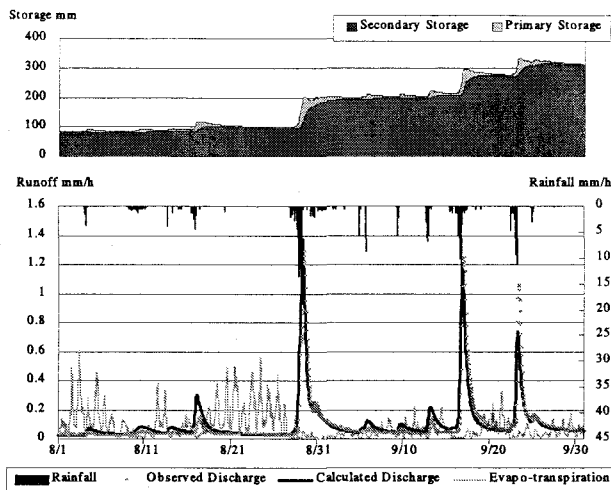


図3 流出再現例 (網走川支流女満別川, 湖南観測所, $A=115.5\text{km}^2$, $k_1=63.7$, $k_2=201.8$, $\alpha=3.15$, $k_{21}=2912$, $k_{22}=3392040$)

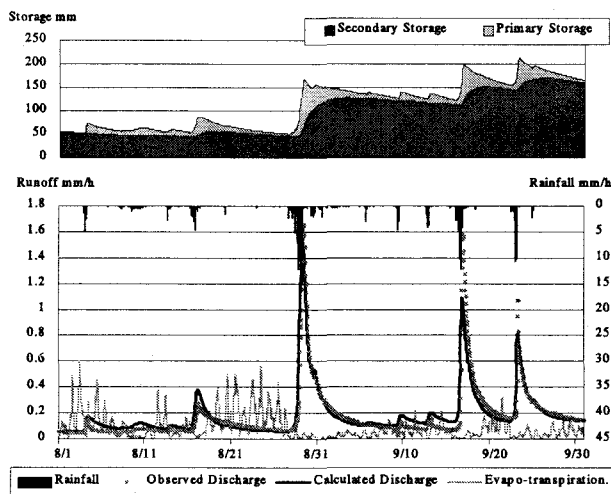


図4 流出再現例 (網走川, 津別観測所, $A=571\text{km}^2$, $k_1=76.2$, $k_2=194.2$, $\alpha=1.64$, $k_{21}=1019$, $k_{22}=415445$)

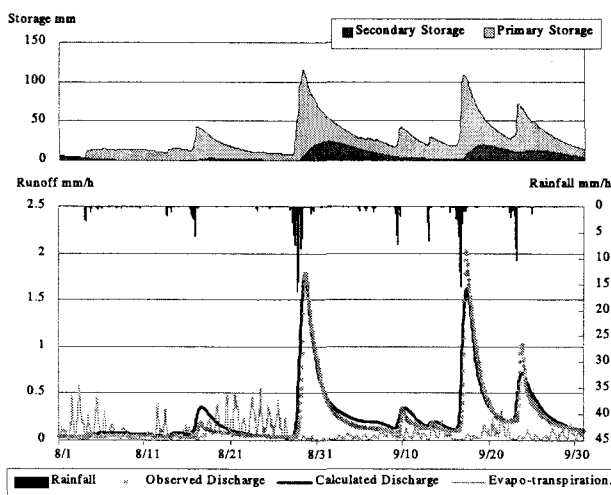


図5 流出再現例 (常呂川, 上川沿観測所, $A=1897.6\text{km}^2$, $k_1=69.7$, $k_2=775.9$, $\alpha=0.36$, $k_{21}=131$, $k_{22}=6914$)

再現計算結果によれば, 長期的に二次貯留高の変化 (本データの場合, 秋季にむけて二次貯留高が増大して

いる傾向)が見られる. 低水流出が流域に貯留された地下水の遅い流出によってもたらされていることが定量的に表現されている.

4. 蒸発散の組み込み効果

佐渡ら¹²⁾によると, 常呂川流域における流域平均降水量は1976~1988年の平均で758mmであるのに対し, 年平均蒸発散量は水収支法によると345mm, 補完関係式などを用いた推定法によると498mmにも達し, 降雨流出過程に与える蒸発散の影響は極めて大きい. そこで, 提案モデルにおける蒸発散の組み込み効果を検証する.

提案モデルは一次流出と二次流出に分離した構造であるから, このモデルにより蒸発散量を省略して流出再現のためのパラメータ最適化を行うことは, 二次流出に関わる連続式を次のように修正して計算するのと同じ意味になる. すなわち $g=0$ として(9)式を(7)式に代入し, s_2^* を蒸発散量 e が累加された見かけ上の二次貯留高として(11)式のとおり定義すると, (7)式は(12)式のように修正される.

$$s_2^* = s_2 + \int edt \quad (11)$$

$$\frac{ds_2^*}{dt} = l_1 - q_2 \quad (12)$$

(6)式の s_2 を s_2^* に置き換えて貯留と流出の関係が成立するためには, 蒸発散量 e の蓄積に相当する分だけパラメータ k_{21} , k_{22} が大きな値をとらなければならない.

常呂川・上川沿観測所の前出例(図5)に対比して, 蒸発散量を考慮しない場合のパラメータ最適化を行った結果(図6)をもとに, このことを検証する.

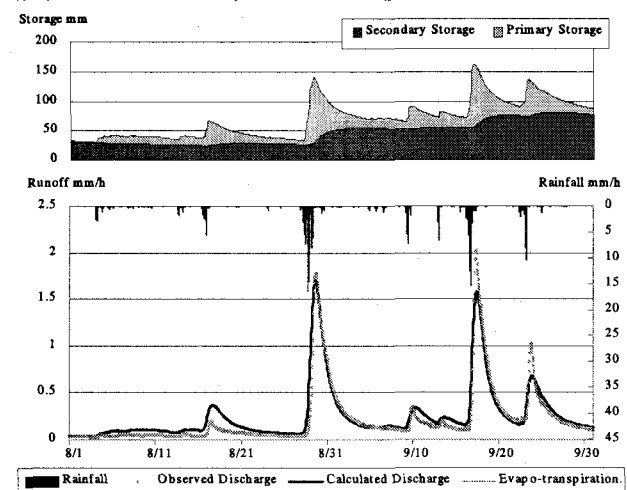


図6 蒸発散を考慮しない流出再現結果

(常呂川, 上川沿観測所, $A=1897.6\text{km}^2$,

$k_1=72.7$, $k_2=800.8$, $\alpha=0.39$, $k_{21}=780$, $k_{22}=243423$)

図5と図6を比較すると, 流出高の再現性には大き

な違いがなく、両者とも良好な結果を得ているが、蒸発散を考慮しない場合には二次貯留高が大きく、時間経過とともに増大している。最適化パラメータを比較すると、一次流出に係る k_{11}, k_{12}, α にほとんど違いはないが、二次流出に係る k_{21}, k_{22} については蒸発散を考慮しない場合のほうが、かなり大きな値となっている。

以上のように、分離される貯留高の定量的な信頼性は、組み込まれる蒸発散量の精度に左右される。蒸発散量の計算値が真値より小さければ、提案モデルによって分離される二次貯留高にその差分が吸収され、時間経過とともに蓄積されていく。

上記の計算とは逆に、蒸発散量が未知数で、流出特性を規定するパラメータが既知の場合、計算された流出高と観測流出高の差によって蒸発散量の逆推定ができる。

図5で示した計算例をもとに、蒸発散量を未知数として上記の方法を適用したところ、解析期間中の8～9月蒸発散量合計は95mmとなった。前節で(10)式によって算出した8～9月蒸発散量合計は129mmであり、この差はモデルの再現誤差に起因すると考えられる。

5. 成分分離における応用

提案モデルは、一次流出がマニング則に従う表面流、二次流出がダルシー則に従う浸透流をモデル化したものである。モデルパラメータの同時最適化を行うことによって容易に流出成分の分離が行え、パラメータの物理的な意味合いを評価することで流出特性の分析が可能である。

流出成分の分離には、一般的にフィルター分離法¹⁴が用いられている。図5に示した流出高再現結果を一次流出と二次流出に分けて表示し、同じ観測記録をフィルター分離法によって表面・中間流と地下水に分離した結果と比較した(図7)。なお、フィルター分離の打ち切り精度=0.0005、成分分離の時定数 $T_c=100$ 、減衰係数=2.1である。分離結果が判別しやすいように、図の縦軸は提案モデルによる二次流出と、フィルター分離法による地下水に注目して、0～1mm/hの範囲で表示した。

比較の結果、両者とも類似した分離結果を示している。フィルター分離の結果は、成分分離の時定数によって異なるが、右定数の決定方法は経験的なものである。ここでは、大きな時定数を用いたところ安定した分離結果が得られた。

一方、提案モデルの分離結果はモデルパラメータによって左右されるが、一次流出を規定する k_{11}, k_{12} については総合化パラメータである(4)、(5)式を、二次流出を規定する k_{21}, k_{22} についてはKinematic Wave理論から集中化⁷して得られる次の式から推定される値を、それ

ぞれ初期値として用いることができる。残されたパラメータ α は実績流出高を用いて最適化を行うが、同時に初期値として用いた k_{11}, k_{12} および k_{21}, k_{22} についてもさらに最適化を図ることにより、流域の特性値として同定できる。

$$k_{21} = \frac{1}{2} (10^{-3} / 3.6) \left(\frac{\lambda}{K \cdot i} \right) L \quad (13)$$

$$k_{22} = 0.4 k_{21}^2 \quad (14)$$

ここに K :透水係数、 λ :有効間隙率、 i :斜面勾配、 L :斜面長である。

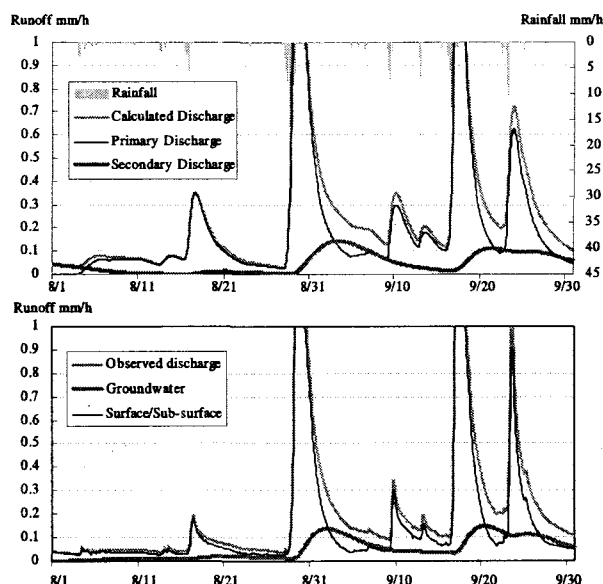


図7 提案モデルによる流出成分の分離(上)とフィルター分離(下)の比較(常呂川, 上川沿観測所, 1998年8～9月, 毎時観測値)

6. 考察

筆者らはこれまで、貯留関数モデルに損失機構を導入する研究を進めてきた^{5,6,8}。本研究では、曖昧だった損失項の内容を吟味した。

具体的には、特に変動が大きいと思われる蒸発散量と浸透損失をパラメータから切り放し、流域の地形的な特性値から理論的に集中化されたパラメータの物理性を保つことを目的にモデルを作成した。蒸発散量については気候学的条件で計算された値を用いることにより、流域の植生指標を取り込むことができるようにした。

その結果、従来にも増してさらに適合性の改良がもたらされ、同時にいくつかの利点を生み出した。主なポイントを整理すると次のようになる。

- 洪水流出の再現性に優れている非線形二価の貯留関数モデルの特徴を受け継ぎながら、地下への浸透が表面流に戻る遅い流出を二次流出として組み入れることにより、さらに再現性が向上し、洪水

期—非洪水期の連続した解析が可能になった。

- 表面流出・浸透流出を組み合わせたわかり易いモデルであり、観測記録を直接扱うことができる。
- 貯留計算を二段階で行いながらも、少ないパラメータで流出機構を再現することができる。
- 一次流出と二次流出との分離を容易に計算でき、成分分離法として応用可能である。

また、(10)式中の LAI は、植生群落の活性度により変化するパラメータであり、季節変化などに対応した流出特性の変化、地被状態の改変による影響などの検討が可能である。Kondoh¹⁵⁾は植生指標と蒸発散量との関係を明らかにしており、石井ら¹⁶⁾はリモートセンシングから LAI を推定している。本モデルは、 LAI を介してこうした計算が可能な形式を備えており、貯留関数法の定量的応用範囲が広がられる。

本論文では2ヶ月間の時間観測値を用いてモデルの検証を行ったが、さらに長期的な観測値を用いた検証が今後の課題となる。複数年にわたる解析によって、長期的に二次貯留高が一定レベルにある状態であれば、推定された蒸発散量の信頼性は高く、二次貯留と二次流出の関係を規定するパラメータ k_{21}, k_{22} が流域特性を正しく反映していると考えられる。

浸透損失量については、流量観測地点より上流域の浸透と湧出が長期的には等しいと考えて無視したが、流域によっては損失高を蒸発散のみでは説明できないことがある。筆者らは二次流出における損失項 l_2 について、 $l_2 = \alpha_2 q_2$ とするモデルも発表した⁸⁾が、長期水収支を考慮すると物理的な意味合いが不明確になるため、最終損失は蒸発散のみによって組み込むのが適切と考えられる。そのためにも、蒸発散量の推定手法には十分な精度が要求される。

7. おわりに

本モデルでは貯留関数を二段階にした上、流出解析で扱う基礎資料に気象学的情報（気温、気圧、相対湿度など）および植生指標を導入した。蒸発散量を正確に推定するには、熱収支をより忠実に再現した二層モデル法などの利用が望ましいが、このためには、さらに植生群落の抵抗係数や蒸発効率などの推定が必要となる。こうした複雑化は、最終的に貯留関数型モデルの実用性が必ずしも向上しない原因を作る。しかし蒸発散のモデル化に関して様々な技術が提案されてきており、気象情報の充実やリモートセンシング技術の発達と合わせ、これら

を取り込むことは必須の流れであると考ええる。

今後の課題としては、流出解析例を増やすことにより本モデルのパラメータを総合化する必要がある。

参考文献

- 1) 永井明博・角屋 陸・杉山博信・鈴木克英(1982)：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
- 2) 永井明博・四方田穆・奥谷順彦(1987)：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
- 3) 永井明博(1995)：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
- 4) 田中敦・藤田睦博・清水康行(1997)：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
- 5) 馬場仁志・星 清(1997)：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
- 6) 馬場仁志・星 清・橋本識秀(1999)：損失機構を組み合わせた貯留関数モデルの総合化，第43回水理講演会論文集，pp. 1085-1090
- 7) 八田茂美・藤田睦博・山梨光訓(1998)：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
- 8) 佐藤力信・嵯峨 浩・馬場仁志・星 清(1999)：損失機構を含む貯留関数法を応用したタンクモデルの提案，土木学会第54回年次学術講演会講演概要集第2部，pp. 634-635
- 9) 星 清(1986)：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
- 10) Montieith, J.L.(1965)：Evapotranspiration and environment. in 'The state and movement of water in living organs' (Fogg, G.E. ed.), Soc. Exp. Biol. Symp. 19, Cambridge University Press, pp.206-234
- 11) McNoughton, K. G. and Black, T. A. (1973): A study of evapotranspiration from a Douglas fir forest using the energy balance approach. Water Resource Res. 9, pp1579-1590
- 12) 佐渡公明・根田聖児(1994)：ランドサットTMデータと補完関係式を用いた流域実蒸発散量年変化の推定—常呂川流域について—，水工学論文集第38巻，pp. 149-154
- 13) 高埴琢馬・椎葉充晴・宝 馨(1983)：複合流域における洪水流出の確率予測手法，京都大学防災研究所年報，第26号B-2，pp. 181-196
- 14) 日野幹雄・長谷部正彦(1985)：FORTRANとBASICによる水文流出解析，森北出版
- 15) Kondoh, A. (1995): Relationship between the Global Vegetation Index and the Evapotranspiration derived from Climatological Estimation Methods. JJSPRS, 34(2), 6-14
- 16) 石井 孝・梨本 真・下垣 久(1999)：衛星データによる葉面積指数 LAI の推定，水文水資源学会誌Vol. 12, No. 3, pp. 210-220

(2001. 4. 16 受付)