

山地河川流域における洪水流出解析

Flood Runoff Analysis for Mountainous River Watershed

山本好克* 丸井信雄**

By Yoshikatsu YAMAMOTO and Nobuo MARUI

This paper presents on a new lumped model for estimation of flood flow from mountainous river watershed. First, the new model is made up of the storage area with the retarding area, the stream reach and the translation reach is proposed. Then, the technique for identification of the model parameters and the procedure for estimation or prediction of flood runoff by the model is introduced. Finally, the model is applied to three mountainous river watersheds, and a validity of the concept of rainfall-runoff process in the model and an availability of the model to mountainous river watersheds are discussed.

keywords : flood runoff, runoff analysis, lumped model

1. はじめに

河川の洪水による災害防止または軽減するための治水対策においては、堤防、ダム、遊水池などの直接・調節的防護によるハードな対応と、避難、水防活動などの間接的防護によるソフトな対応が考えられる。これらの対応のいずれにおいても、洪水のハイドログラフの設定が基本となるため、流域の降雨量から河川の流出量を計算する流出モデルが必要となる。また、都市への人口集中や土地利用の高度化に伴ない、流域の洪水被害ポテンシャルが増大している近年では、被害を最小限度にとどめるためのソフトな対応や対策を実行する上での洪水予警報は極めて重要であり、信頼性の高い洪水予警報のための適切な洪水流出モデルの確立が望まれる。こうした洪水流出モデルに求められる要件はいくつか考えられるが、とりわけ、流域固有の定数を有し、計算が容易かつ迅速にでき、計算値が実測値をよく再現することにある。そのためには、実際の降雨に対して、流域の流出特性が的確かつ簡潔に表現されたモデルであることが必要となる。

著者らは、洪水流出も低水流出も同じ降雨から生起するものであるから、これらは一連となった流出過程であろうとの観点から、流域の降雨を洪水分と低水分とに分離することなく、洪水流出と低水流出とを同一

* 正会員 工修 群馬工業高等専門学校助教授 土木工学科

(〒371 群馬県前橋市鳥羽町 580)

** 正会員 元東京都立大学教授 工学部土木工学科

(〒194 東京都町田市金森 1793)

の関数関係を用いて連続的に解析可能な“遊水モデル”を構築し、実流域への適用例により、モデルにおける降雨流出機構の妥当性および短期・長期流出解析法としての有用性を示した^{13,23)}。

本研究では、上述の遊水モデルにおける流出現象の概念および基本式を改良した“遊水モデル”の降雨流出機構の妥当性と流域固有の定数設定の可能性、および、洪水流出計算法としての有用性について、利根川水系の神流川試験流域と神流川下久保ダム流域また渡良瀬川草木ダム流域を対象として検討する。

2. 遊水モデルについて

2.1 流出現象の概念

遊水モデルでは、山地河川流域からの降雨の流出現象を支配するものは河道における貯留作用と河道わきの遊水作用であろうとし、図-1に示すように、遊水部を付属した貯留部および河道部と流下部とから成る流域における降雨流出機構を考えている。なお、河道わきの遊水作用は、雨水が流下する河道わきの山腹斜面の透水層への浸透、あるいは、河道わきに氾濫源のような遊水地が存在し、河道の各部で“遊水”が伴う、と考えたものである。

こうしたモデルにおける降雨流出機構では、貯留部上流端から流入した流域の降雨 $I(t)$ が遊水部で遊水作用 $S'(t)$ を受けながら貯留部で貯留作用 $\bar{S}(t)$ を受けて流出 $\bar{Q}(t)$ し、それが下流の河道部に流入し、そこで貯留作用 $S(t)$ を受けて流出 $Q(t)$ し、さらに、流下部で時間 T だけ移動して流出 $Q(t+T)$ する過程を表現している。

遊水部を付属した貯留部が n 個から成る流域における降雨流出機構を考えた前述の“遊水モデル”を改良した本モデルは、流域の流出現象をより適切にかつ簡潔に表現されているものと考えられる。

2.2 モデルの基本式

モデルにおける降雨流出機構を表現する基本式は、水理学的運動の基礎式およびその集中化によって求めることができる¹⁾。すなわち貯留部は、河道わきへの単位長さ当たりの流出入量を考慮した河道における不定流の連続式と運動方程式を集中化して導びかれ、それぞれ式(1)、(2)で表わされる。ここで式(2)は、より実際の流出現象を表現するために改良されたものである。遊水部のそれらは、連続式である式(3)と貯留部と遊水部との間を鉛直な開口部の流れを想定した近似式である式(4)で、また、河道部は、不定流の連続式を集中化した式(5)、および、等流の連続式である式(6)で表わされる。流下部は、不定流の連続式と平均流速公式から導びかれる伝ぱん速度による流下時間の概念に相当するもので、ここでは“ずれ時間 T ”とする。

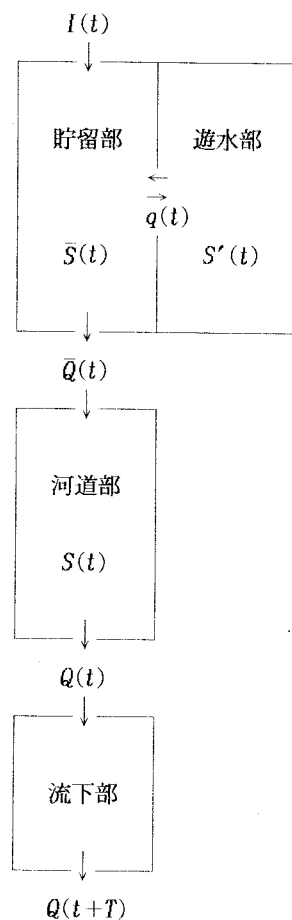


図-1 モデルの概念図

$$\frac{d\bar{S}}{dt} = I - \bar{Q} - q \quad \text{----- (1)}, \quad \bar{Q} = a(e^{b\bar{S}} - 1) \quad \text{----- (2)}$$

$$\frac{dS'}{dt} = q - E \quad \text{----- (3)}, \quad q = \alpha \bar{S}(\bar{S} - \beta S') \quad \text{----- (4)}$$

$$\frac{dS}{dt} = \bar{Q} - Q \quad \text{----- (5)}, \quad Q = vA \quad \text{----- (6)}$$

ここに、 $\bar{S}$:貯留部の貯留量、 I :貯留部への流入量、 $\bar{Q}$:貯留部から河道部への流入量、 q :貯留部から遊水部への流量（遊水部から貯留部へ流れるときは、符号が逆になる。）、 S' :遊水部の貯留量、 E :遊水部において

発生する消失量、 S :河道部の貯留量、 Q :河道部からの流出量、 v :河道部の平均流速、 A :河道部の流積、 $a; b$:貯留部の河道部への流出に関する定数、 $\alpha; \beta$:貯留部と遊水部の間の流れに関する定数、である。

3. 洪水流出の解析法と計算法

遊水モデルによる洪水流出計算とは、あらかじめ対象流域の降雨・流出記録を用いてその流域の降雨流出特性を明らかにした流域固有のモデル定数を決定、すなわち流出解析を行ない、こうして決定されたモデルを用いて、実測あるいは予測した降雨量から流出量を推定することである。

3.1 流出解析法

本モデルによる流出解析は、モデル基本式(1)～(6)を次式のように3元連立一階常微分方程式に変換し、Runge-kutta 法を用いて行なう。

$$\frac{dQ}{dt} = b(\bar{Q} + a)(I - \bar{Q} - q) \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{d\bar{S}}{dt} \frac{q}{\bar{S}} + \alpha \bar{S} \left\{ \frac{d\bar{S}}{dt} - \beta(q - E) \right\} \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \gamma Q^m (\bar{Q} - Q) \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $\frac{d\bar{S}}{dt} = I - \bar{Q} - q$ 、 $\bar{S} = \frac{1}{b} \ln \left[\frac{\bar{Q}}{a} + 1 \right]$ 、である。また、 $\gamma; m$ は、河道部の平均流速 v と流出量 Q の関係を $v = \gamma Q^m$ で表わした河道部の流出に関する定数、である。

こうして、対象流域の降雨流出特性によって決定される流域固有の定数は、 $a、b、\alpha、\beta、\gamma、m$ および T の 7 個となる。なお、定数 m は、河道の断面形状によって決まる量であるから、あらかじめ固定できる。ちなみに、平均流速公式Chezy式と広幅放物線形断面を仮定すると、 $m=1/4$ となる。

実際の流出解析では、 $\bar{Q}=Q=Q_0$ (計算開始時の実測流出量)、 $q=q_0(=0)$ の初期値と、 I に流域平均降雨量(ティーセン法による)を与え、式(7)～(8)をRunge-kutta法によって解き、得られたハイドログラフを時間 T だけずしたものが求める洪水ハイドログラフとなるが、その際各定数は、実測洪水ハイドログラフとの適合性から試行的に決定する。ここで式(8)の消失量 E は、蒸発散量が主要なものであると考えられ、1日数 mm 程度であろうから、洪水流出にはほとんど影響しないものとする。

3.2 流出計算法

本モデルによる流出計算は、対象流域固有の定数が固定されれば、図-2に示すように容易かつ迅速に行なうことができる。すなわち、 $t(>0)$ 時刻先の推算洪水量 $Q(1) \sim Q(t)$ は、 $\bar{Q}、Q$ に計算開始 0 時刻の実測流量と $q=0$ および流域平均降雨量 $I(1) \sim I(t)$ の実測値あるいは予測値を与え、流域固有の定数を組み込んだ式(7)～(9)をRunge-kutta法によって計算し、 T 時間ずらせば洪水ハイドログラフが得られる。

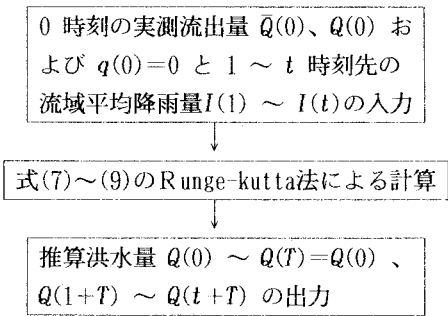


図-2 洪水流出計算のフロー

4. 実河川流域への適用

本研究で対象とする流域と洪水は、神流川試験流域(面積 373.6 km²)若泉地点の6洪水³⁾とその上流域である下久保ダム流域(面積322.9 km²)の2洪水および草木ダム流域(面積254 km²)の5洪水である。

流出解析では、まず対象洪水のうちピーク流出高 3.6 mm/hr (比流量 1 m³/s/km²)以上の大小 2 洪水について、誤差 E1 が ±10% 以内かつ誤差 E2 が最小となる条件のもとで、試行錯誤法によって最適定数を求める。なお、定数 m を広幅放物線形断面を仮定して 1/4 とおき、流域平均降雨量 I と流出量 Q の値を mm/hr とすると定数値は、 $a \text{ mm} \cdot \text{hr}^{-1}$ 、 $b \text{ mm}^{-1}$ 、 $\alpha \text{ mm}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ 、 β 、 $\gamma \text{ mm}^{-1/3} \cdot \text{hr}^{-1}$ および $T \text{ hr}$ である。次に、相互の最適定数を用いた流出計算を行ない、その再現性と誤差を比較して対象流域固有の定数を決定する。

また、流出計算では、流域固有の定数をモデルに組み込み、大小 2 洪水以外の洪水の実測降雨量を用いて洪水ハイドログラフを推算し、その適合度を誤差 E1、E2 およびピーク流出高の平方誤差 E3 で評価する。

こうした誤差の評価手法は、次式である。

$$E1 = \frac{Q_{o,p} - Q_{c,p}}{Q_{o,p}} \quad , \quad E2 = \sum \left\{ \frac{Q_o - Q_c}{Q_o} \right\}^2 \quad , \quad E3 = \frac{1}{N} \sum \left\{ \frac{Q_o - Q_c}{Q_{o,p}} \right\}^2$$

ここに、 $Q_{o,p}$: 実測ピーク流出高、 $Q_{c,p}$: 計算ピーク流出高、 Q_o : 実測流出高、 Q_c : 計算流出高、 N : 計算時間数、である。

4.1 神流川試験流域・下久保ダム流域

表-1 には、対象洪水とその生起年 (昭和) 月日およびピーク流出高 (mm/hr) を示してある。

表-1 対象洪水

洪水	年月日	流出高	洪水	年月日	流出高
神 1	30101	3.06	神 5	34812	20.6
神 2	31926	2.88	神 6	34925	6.48
神 3	33917	15.4	下 1	56822	7.48
神 4	33923	11.8	下 2	57910	9.38

(a) 流出解析結果

大小洪水 (神 5、神 6) の流出解析では、表-2 の最適定数を得た。図-3 には、その再現結果を示してある。

表-2 最適定数値

洪水	a	b	α	β	γ	T
神 5	.04	.05	.001	2	.40	3
神 6	.01	.06	.001	2	.22	2

こうして、相互の最適定数値を用いて流出計算を行ない、図-3 に示す再現性および誤差を比較検討した結果、神流川試験流域固有の定数は、神 6 のものであることを見いだした。

(b) 洪水流出再現結果

流域固有定数 (神 6 の値) を用いた、神 1~4 および下 1、下 2 の実測降雨量による推定結果の一例は、実測値と比較して図-4、5 に示してある。なお図-5 には、 $\gamma = 0.10 \text{ mm}^{-1/3} \cdot \text{hr}^{-1}$ 、 $T = 0 \text{ hr}$ とし、その他の定数は固定した場合の洪水推定結果も示してある。またそれらの推定誤差は、表-3 に示した。

4.2 草木ダム流域

表-4 には、対象洪水とその生起年 (昭和) 月日およびピーク流出高 (mm/hr) を示してある。

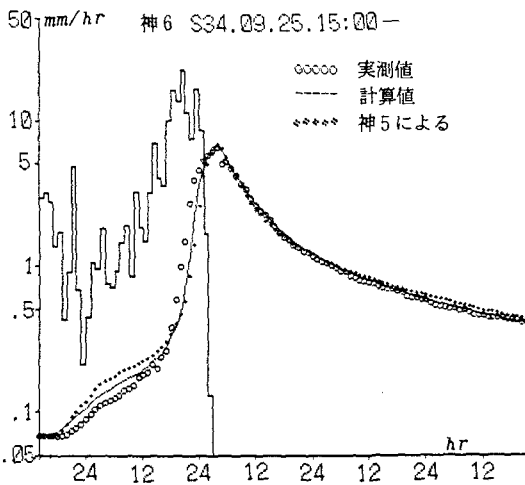
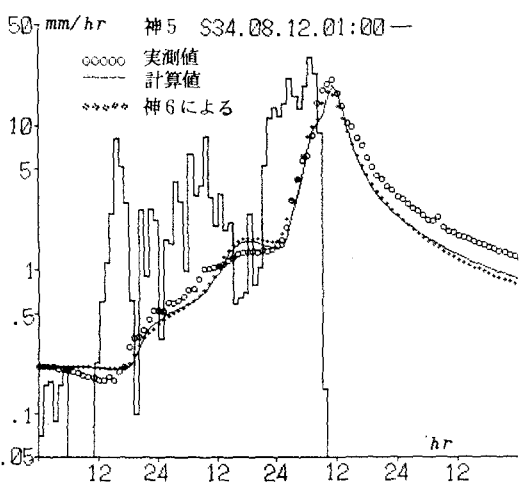


図-3 神流川試験流域の流出解析結果

表-3 推定誤差

洪水	E1	E2	E3
神1	-.007	2.09	.0009
神2	-.098	7.32	.0001
神3	-.053	4.43	.0007
神4	-.092	10.3	.0018
下1	.048	24.8	.0029
下2	.095	2.55	.0017

表-4 対象洪水

洪水	年月日	流出高	洪水	年月日	流出高
草1	54101	4.06	草4	57909	3.20
草2	56822	4.91	草5	60630	3.83
草3	57731	6.24			

(a) 流出解析結果

表-5には、大小洪水(草3、草4)の流出解析で得られた最適定数値を、また、図-6には、その再現結果を示してある。

表-5 最適定数値

洪水	a	b	α	β	γ	T
草3	.02	.04	.003	2	.39	0
草4	.01	.04	.001	2	.40	1

こうして、草木ダム流域固有の定数は、神流川試験流域の場合と同様にして検討した結果、草4のものであることを見いだした。

(b) 洪水流出再現結果

流域固有定数(草4の値)を用いた、草1、2、5の実測降雨量による推定結果の一例を、実測値と比較して図-7に、また誤差を表-6に示してある。

表-6 推定誤差

洪水	E1	E2	E3
草1	.077	3.36	.0032
草2	.096	11.9	.0019
草5	-.007	4.27	.0018

4.3 考察

大小2洪水の流出解析で得られた最適定数による再現性は、図-3、6のようにきわめて良好であり、また、相互の最適定数を用いた流出計算による再現性と誤差の比較から、流域固有の定数が見い出された。さらに、洪水流出推定結果では、図-4、5、7のように再現性が良好であるとともに、表-3、6の推定誤差も、対象洪水すべてにおいて、ピーク流出高相対誤差が $\pm 10\%$ 以内でありかつピーク生起

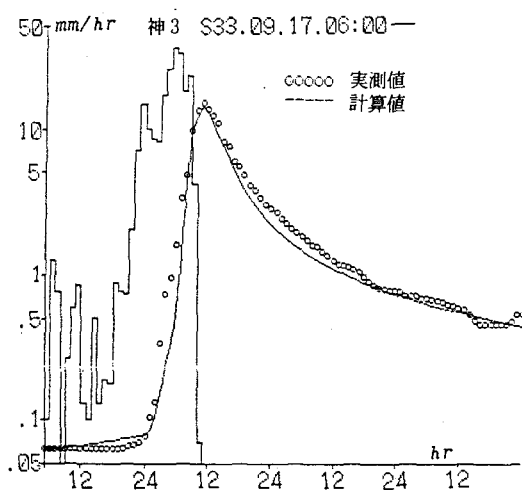
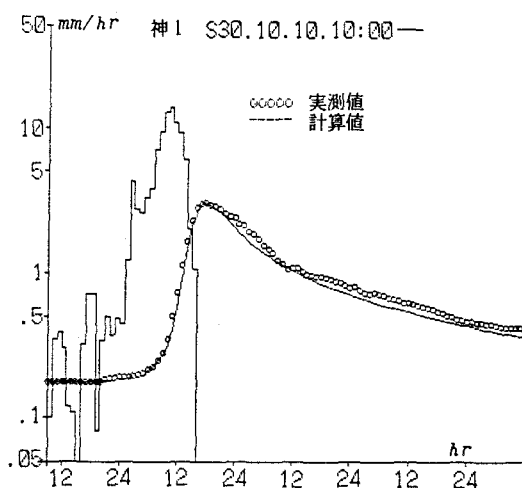


図-4 若泉地点の洪水再現結果の一例

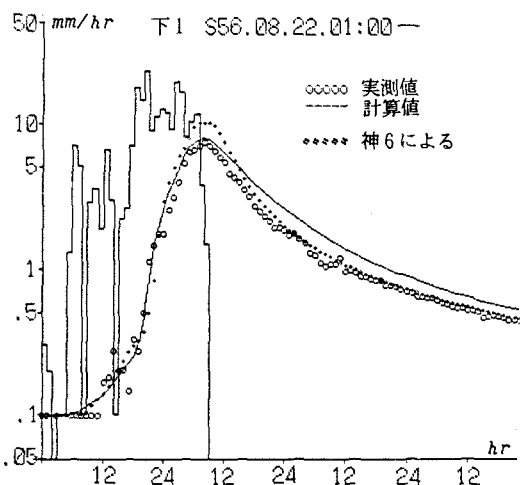


図-5 下久保ダム流入量再現結果の一例

時刻が一致している。また、ピーク平方誤差も、流出モデルに望まれる値(0.03以下)を示している。

5. おわりに

実河川流域での流出解析では、再現性良好な結果が得られ、本モデルによる降雨流出機構の概念とその基本式の妥当性が示されるとともに、流域固有の定数設定が可能であることが明らかとなった。

また、洪水流出計算においては、推定量の再現性と誤差において満足しうる結果が得られ、本モデルの洪水流出計算法としての有用性が示された。

なお、神流川流域若泉地点上流に位置する下久保ダムへの流入量計算では、モデルの河道部と流下部の定数値をかえるだけで再現性が改良された。こうしたモデル定数と流域規模や形状などの流域特性との関連性についての検討は、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 山本好克・丸井信雄：遊水モデルにおける流出機構に関する一考察、第30回水理講演会論文集、pp.133~138、1986
- 2) 山本好克・丸井信雄：遊水モデルによる山地流域の流出解析、第31回水理講演会論文集、pp.101~106、1987
- 3) 建設省土木研究所：神流川流域水文資料、土木研究所資料、第324号、1968

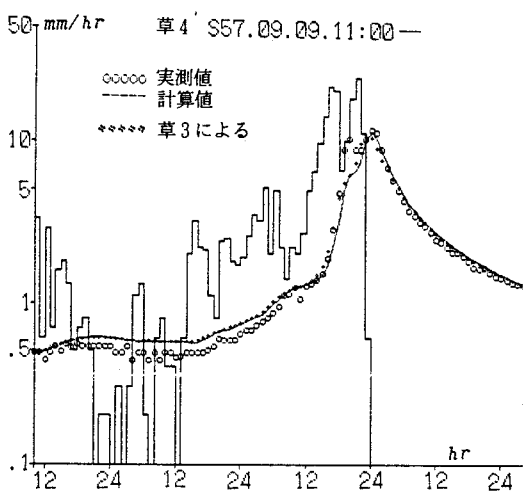
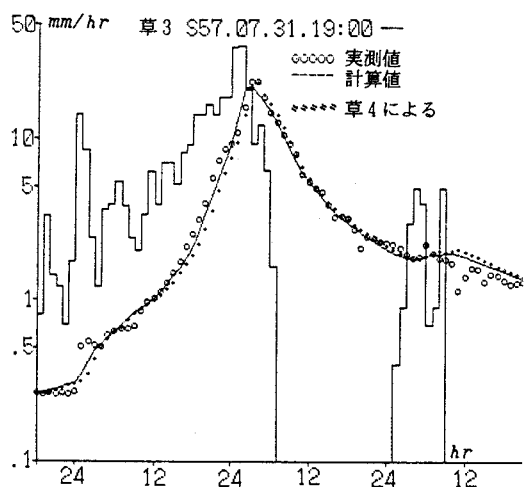


図-6 草木ダム流域の流出解析結果

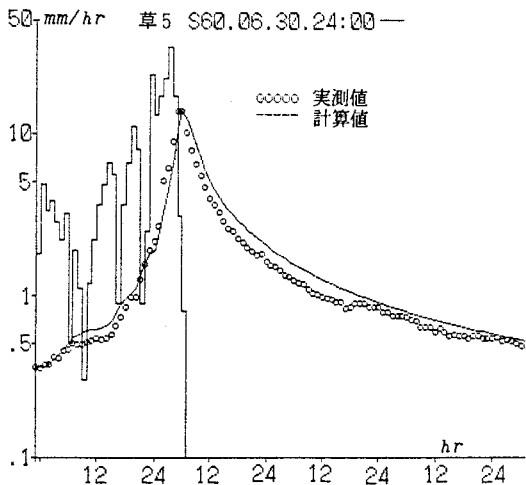
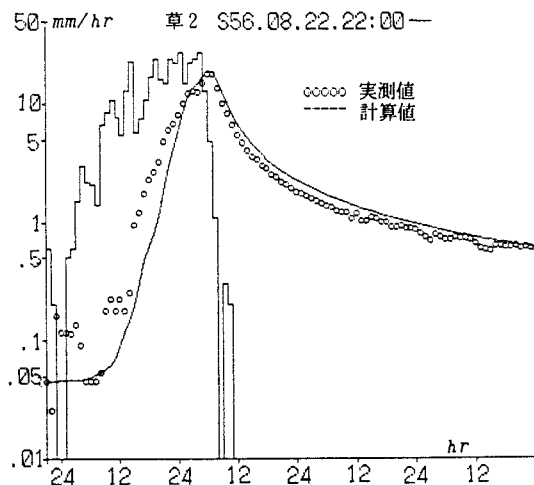


図-7 草木ダム流入量再現結果の一例