

角屋・永井法の長短期流出両用モデルの応用

福島 晨*・田中礼次郎*

Application of Storage Model for Analyzing Flood
and Long Term Runoff by KADOYA and NAGAI's Method
Akira FUKUSHIMA and Reijiro TANAKA

Three runoff models based on the model proposed by Kadoya and Nagai are developed as a clue for improving the reproducibility of hydrograph for peak flood duration. The first model is composed of four series storage tanks. The first upper tank is divided into upper and lower tanks. And the effect of depression storage is included in the first upper tank. The structure of lower tank is the same as the Kadoya and Nagai's model. The first upper tank is divided into two parts in the ratio of β in left to $1-\beta$ in right, too. In the left part, only the surface runoff occurs due to the input of rain water. In the right part, both surface and prompt subsurface runoff occur. The second model is arranged the first model in parallel for evaluating the effect of storage in the runoff process of the basin slope. The third model is composed by kinematic wave runoff model in the upper zone and the lower part of the storage model proposed by Kadoya and Nagai in the lower zone. Runoff simulation for three runoff models is examined and it is pointed out that the last is the best model from a physical view point of runoff. The reservation curve of rain water is calculated from the value of effective rainfall estimated by the last model. And the characteristics of reserved rain water at small or mild intensity rainfall is shown well by the curve.

1. ま え が き

最近、角屋・永井によって開発提案された洪水流出および低水流出を同時に解析できる長短期流出両用モデル^{1),2)}は、短期流出、長期流出と現象、解析目的別に使い分けられてきた従来の流出解析手法を改良、統合した画期的な流出モデルとして注目される。

本流出モデルは降雨遮断量、および Manning 型表面流、速い中間流、遅い中間流、地下水流の各流出成分の他に、Horton 型の浸透能がモデルに組み込まれている特徴をもち、また従来の洪水流出解析法で常に問題となる有効降雨が本流出モデルでは自動的に推定されるモデル構造となっている。

角屋・永井は洪水流出時および長期流出について本流出モデルの適応性を検討し、とくに、長期流出について

は菅原のタンクモデルによる解析結果より相当すぐれた結果^{2),3),4)}が得られると報告している。

筆者らも、2, 3の実流域における水文観測資料にもとづき、本流出モデルのモデル定数を推定し、本流出モデルの適用結果を報告した⁵⁾。

これらの解析結果より、本流出モデルは実用的には十分満足できるモデルであることが実証されたといえるが、洪水のオンライン予測、あるいは洪水・濁水比流量の地域特性の分析の問題に本流出モデルを応用しようとする場合、角屋・永井の指摘のように、なお検討すべき問題点がいくつか残されている。

そこで、本流出モデルを基礎にしながら、本報告では i) 洪水ピーク流出部の再現性に改良の余地が残されていないか、ii) 本流出モデルで自動的に振り分けられる表面流出、早い中間流出の両流出成分についての有効降雨を推定することにより、雨水流モデルのモデル定数が

* 農業水利工学研究室

評価できないか等について若干検討した結果について述べる。

2. 角屋・永井法の長短期流出両用モデルを用いた流出モデル

角屋・永井が開発提案した長短期流出両用モデル LST-IIは図1に示すように3段タンクで構成されており、1段目は上層と下層に分かれている。なお、次式で樹木等による降雨遮断を考え、流域平均降雨量より降雨遮断量を差し引いた雨量を第1段目タンク上層に入力するように配慮されている。

$$I = (z_0 - S_{00}) \{1 - \exp(-R/z_0)\} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 I : 降雨遮断可能量 (mm), R : 累加雨量 (mm), z_0 : 最大遮断量 (mm), S_{00} : 初期貯留量 (mm), 本流出モデルの応用に際し、残された検討課題とされているいくつかの問題点が指摘されている^{1),3)}。また、丘陵山林地で施工されている農地造成事業などにみられる流域の部分開発の影響、あるいは農地造成域の排水路系における圃場内沈砂池、防災ダムの貯留効果、集水域内の浸透域、不浸透域の面積割合などを考慮しようとする場合、本流出モデルを基礎にしなから、さらに若干検討する余地が残されているように思われる。

そうした観点から、ここでは前述の i), ii) の課題を解決する手法の一つとして、以下に示す流出モデルを考え、若干の検討を試みる。なお、いずれの流出モデルにも(1)式で与えられる降雨遮断効果を考慮することにする。

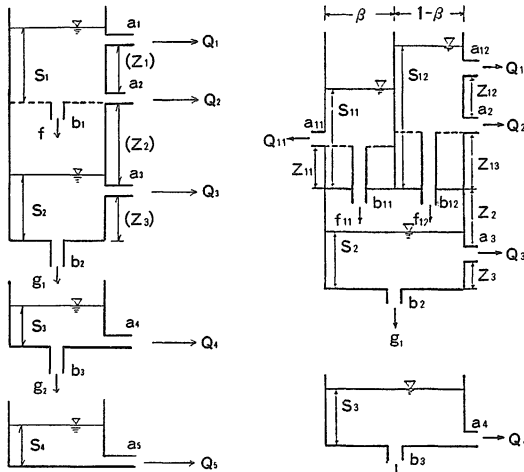


図1 長短期流出両用モデル (角屋・永井法, LST-II)

2.1 流出モデル I

図2に示すモデルは角屋・永井法のモデルの第1段タンク上層部を面積比 $\beta : 1-\beta$ に2分割し、表面流出割合を増大させ、かつ、ピーク流出量を大きくしようとするものである。すなわち、左側タンク部分からは $S_{11} > z_{11}$ のとき角屋・永井法と同形式の表面流出、また右側タンクからは $S_{12} > z_{12} + z_{13}$ のとき早い中間流出、 $S_{12} > (z_{12} + z_{13})$ のとき表面流出、早い中間流出に相当する流出成分を算定する構造となっている。なお、前報の検討過程において、 z_0 を定数とするより、変数として最適同定した方が良好な結果が得られたことから、ここでは降雨遮断量の上限 z_0 は固定し、流域地表面における凹地貯留効果等を加味する流出孔の高さ z_{11}, z_{13} が設定してある。

本流出モデルによる計算基礎式は次のとおりである。

i) 連続の式

$$\frac{dS_{11}}{dt} = r_a - Q_{11} - f_{11} \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{dS_{12}}{dt} = r_a - Q_{12} - Q_2 - f_{12} \dots \dots \dots (3)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = \beta f_{11} + (1-\beta) f_{12} - Q_3 - g_1 \dots \dots \dots (4)$$

$$\frac{dS_3}{dt} = g_1 - Q_4 - g_2 \dots \dots \dots (5)$$

$$\frac{dS_4}{dt} = g_2 - Q_3 \dots \dots \dots (6)$$

ii) 流出高, 浸透高 (mm/h)

$$Q_{11} = A_{11} (S_{11} - z_{11})^m = \frac{\alpha}{B} \left(\frac{S_{11} - z_{11}}{a_{11}} \right)^m \dots \dots \dots (7)$$

$$Q_{12} = A_{12} (S_{12} - z_{12} - z_{13})^m = \frac{\alpha}{B} \left(\frac{S_{12} - z_{12} - z_{13}}{a_{12}} \right)^m \dots \dots \dots (8)$$

$$Q_2 = A_2 (S_{12} - z_{13}) = \frac{\alpha}{B} a_2 (S_{12} - z_{13}), \text{ (for } S_{12} < z_{12} + z_{13}) \dots \dots \dots (9)$$

$$Q_2 = A_2 z_{12} = \frac{\alpha}{B} a_2 z_{12}, \text{ (for } S_{12} \geq z_{12} + z_{13}) \dots \dots \dots (10)$$

$$Q_3 = A_3 (S_2 - z_3) = \frac{\alpha}{B} a_3 (S_2 - z_3) \dots \dots \dots (11)$$

$$Q_4 = A_4 S_3 = \frac{\alpha}{B} a_4 S_3 \dots \dots \dots (12)$$

$$Q_5 = A_5 S_4 = \frac{\alpha}{B} a_5 S_4 \dots \dots \dots (13)$$

$$f_{11} = B_{11} (z_2 + z_3 - S_2) = \frac{\alpha}{B} b_{11} (z_2 + z_3 - S_2) \dots \dots \dots (14)$$

$$f_{12} = B_{12} (z_2 + z_3 - S_2) = \frac{\alpha}{B} b_{12} (z_2 + z_3 - S_2) \dots \dots \dots (15)$$

$$g_1 = B_2 S_2 = \frac{\alpha}{B} b_2 S_2 \dots \dots \dots (16)$$

$$g_2 = B_3 S_3 = \frac{\alpha}{B} b_3 S_3 \dots \dots \dots (17)$$

図2 流出モデル I

ここに、 $S_{11} \sim S_4$ ：貯留量 (mm)， r_a ：降雨遮断効果を受けた後の降雨強度 (mm/h)， f_{11}, f_{12} ：浸透強度 (mm/h)， g_1, g_2 ：下段タンクへの供給高 (mm/h)， $Q_{11} \sim Q_5$ ：各流出成分に対応する流出高 (mm/h) で、 Q_{11}, Q_{12} は表面流出， Q_2 は早い中間流出， Q_3 は遅い中間流出， Q_4, Q_5 は地下水流出を表わしている。 β ：第1段タンク上層部における表面流出 Q_{11} の発生場面積比， $A_{11} \sim A_5, B_{11} \sim B_3$ ：角屋・永井法の定数， $a_{11} \sim a_5, b_{11} \sim b_3$ ：定数，ただし、 a_{11}, a_{12} は表面流モデルの斜面流定数 k に相当する定数 ($m^{-1} \cdot s^3$)， a_2, a_3 は中間流モデル定数 $k_I \cdot s / \lambda$ に相当する定数 (cm/s)， a_4, a_5 は地下水流を規定する定数 (cm/s)， $b_{11} \sim b_3$ ：鉛直方向の浸透量を規定する定数 (cm/s)， $z_{11} \sim z_3$ ：流出孔の高さ (mm)， α ：換算係数で計算単位時間を Δt 秒としたとき、 $\alpha = \Delta t \times 10^{-2}$ となるが、各変量に上述のような単位を用いると $\alpha = 36$ となる。 $m = 5/3$ 。

なお、 Q, g は貯留量が孔の高さを越える場合にのみ流出があるものとするが、早い中間流に相当する流出成分は(10)式に示すように上限が設定してある。

また、流出高、浸透高を表わす式で角屋・永井法の定数 $A_{11} \sim A_5, B_{11} \sim B_3$ が換算係数 α 、および平均斜面長 B を用い定数 $a_{11} \sim a_5, b_{11} \sim b_3$ に書き改められている。これは角屋・永井法の長短期流出両用モデルのモデル定数を雨水流法に用いられているモデル定数と対応つけて理解できるように配慮したことによる。すなわち、図3のような流域ブロックを考えると、定常流のもとでは次式の関係が得られることを利用している。

$$q_* = \left(\frac{q_s}{B} \right) \times 3.6 \times 10^6 \quad \dots\dots(18)$$

ここに、 q_* ：流出高 (mm/h)， q_s ：斜面単位幅流量 (m^2/s)， B ：平均斜面長(m)。

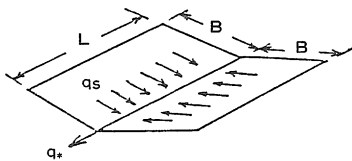


図3 流域ブロック

2.2 流出モデル II

図4に示すモデルは降雨波形および出水規模により流域斜面部における表面流出、中間流出の生起場が時間的に変化する事、また流域斜面上、中、下流部の土壌水分形態の差異などを想定し、図2の流出モデルを並列に配置したものである。

図4に示す流出モデルによる計算基礎式は以下のようになる。

i) 上流斜面域における連続の式

$$dS_{11,1}/dt = r_a - Q_{11,1} - f_{11,1} \quad \dots\dots(19)$$

$$dS_{12,1}/dt = r_a - Q_{12,1} - Q_{2,1} - f_{12,1} \quad \dots\dots(20)$$

$$dS_{2,1}/dt = \beta f_{11,1} + (1-\beta)f_{12,1} - Q_{3,1} - g_{1,1} \quad \dots\dots(21)$$

$$dS_{3,1}/dt = g_{1,1} - Q_{4,1} - g_{2,1} \quad \dots\dots(22)$$

$$dS_{4,1}/dt = g_{2,1} - Q_{5,1} \quad \dots\dots(23)$$

ii) 中部斜面域における連続の式

$$dS_{11,2}/dt = r_a + \gamma_1 Q_{11,1} / \gamma_2 - Q_{11,2} - f_{11,2} \quad \dots\dots(24)$$

$$dS_{12,2}/dt = r_a + \gamma_1 (Q_{12,1} + Q_{2,1}) / \gamma_2 - Q_{12,2} - Q_{2,2} - f_{12,2} \quad \dots\dots(25)$$

$$dS_{2,2}/dt = \beta f_{11,2} + (1-\beta)f_{12,2} + \gamma_1 Q_{3,1} / \gamma_2 - Q_{3,2} - g_{1,2} \quad \dots\dots(26)$$

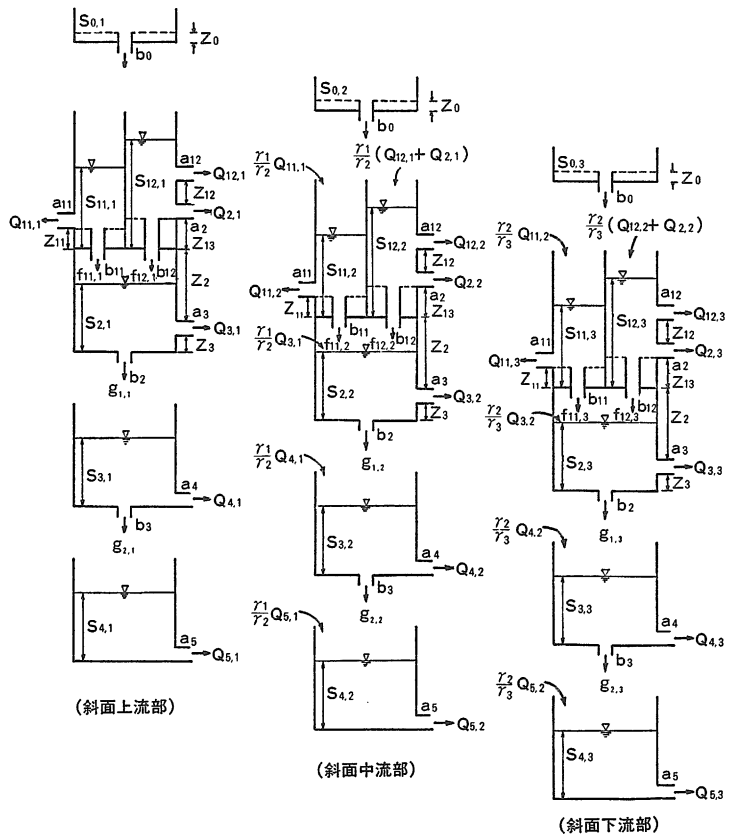


図4 流出モデル II

$$dS_{3,2}/dt = g_{1,2} + \gamma_1 Q_{4,1} / \gamma_2 - Q_{4,2} - g_{2,2} \quad \dots\dots\dots(27)$$

$$dS_{4,2}/dt = g_{2,2} + \gamma_1 Q_{5,1} / \gamma_2 - Q_{5,2} \quad \dots\dots\dots(28)$$

iii) 下部斜面域における連続の式

$$dS_{11,3}/dt = r_a + \gamma_2 Q_{11,2} / \gamma_3 - Q_{11,3} - f_{11,3} \quad \dots\dots\dots(29)$$

$$dS_{12,3}/dt = r_a + \gamma_2 (Q_{12,2} + Q_{2,2}) / \gamma_3 - Q_{12,3} - Q_{2,3} - f_{12,3} \quad \dots\dots\dots(30)$$

$$dS_{2,3}/dt = \beta f_{11,3} + (1 - \beta) f_{12,3} + \gamma_2 Q_{3,2} / \gamma_3 - Q_{3,3} - g_{1,3} \quad \dots\dots\dots(31)$$

$$dS_{3,3}/dt = g_{1,3} + \gamma_2 Q_{4,2} / \gamma_3 - Q_{4,3} - g_{2,3} \quad \dots\dots\dots(32)$$

$$dS_{4,3}/dt = g_{2,3} + \gamma_2 Q_{5,2} / \gamma_3 - Q_{5,3} \quad \dots\dots\dots(33)$$

iv) 流出高, 浸透高 (mm/h)

$$Q_{11,i} = A_{11} (S_{11,i} - z_{11})^m = \frac{\alpha}{B} \{ (S_{11,i} - z_{11}) / a_{11} \}^m \quad \dots\dots\dots(34)$$

$$Q_{12,i} = A_{12} (S_{12,i} - z_{12} - z_{13})^m = \frac{\alpha}{B} \{ (S_{12,i} - z_{12} - z_{13}) / a_{12} \}^m \quad \dots\dots\dots(35)$$

$$Q_{2,i} = A_2 (S_{12,i} - z_{13}) = \frac{\alpha}{B} a_2 (S_{12,i} - z_{13}) \quad \text{(for } S_{12,i} < z_{13} + z_{12} \text{)} \quad \dots\dots\dots(36)$$

$$Q_{2,i} = A_2 z_{12} = \frac{\alpha}{B} a_2 z_{12}, \quad \text{(for } S_{12,i} > z_{13} + z_{12} \text{)} \quad \dots\dots\dots(37)$$

$$Q_{3,i} = A_3 (S_{2,i} - z_3) = \frac{\alpha}{B} a_3 (S_{2,i} - z_3) \quad \dots\dots\dots(38)$$

$$Q_{4,i} = A_4 S_{3,i} = \frac{\alpha}{B} a_4 S_{3,i} \quad \dots\dots\dots(39)$$

$$Q_{5,i} = A_5 S_{4,i} = \frac{\alpha}{B} a_5 S_{4,i} \quad \dots\dots\dots(40)$$

$$f_{11,i} = B_{11} (z_2 + z_3 - S_{2,i}) = \frac{\alpha}{B} b_{11} (z_2 + z_3 - S_{2,i}) \quad \dots\dots\dots(41)$$

$$f_{12,i} = B_{12} (z_2 + z_3 - S_{2,i}) = \frac{\alpha}{B} b_{12} (z_2 + z_3 - S_{2,i}) \quad \dots\dots\dots(42)$$

$$g_{1,i} = B_2 S_{2,i} = \frac{\alpha}{B} b_2 S_{2,i} \quad \dots\dots\dots(43)$$

$$g_{2,i} = B_3 S_{3,i} = \frac{\alpha}{B} b_3 S_{3,i} \quad \dots\dots\dots(44)$$

ここに, $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ は流域斜面域を上部, 中部, 下部斜面域に分割したときのそれぞれの面積割合を示す。この流域斜面域の分割方法としては, i) 流域の面積—高度曲線の形状特性を考慮して分割する, ii) 流域の上流, 中流, 下流域の土地利用形態ないし地質分布特性を考慮して分割する等が考えられる。また各変数の定義は前述2.1に示した流域モデルIと同様である。ただし, 2つの添字をもつ変数については, 2番目の添字 $i=1, 2, 3$ がそれぞれ上部, 中部, 下部斜面域での値であることを示す。

2.3 流出モデル III

図5に示すモデルは角屋・永井法のモデルにおいて最上段の降雨遮断タンク, および第1段タンク下層部, 第2~3段タンクはそのまま利用し, 表面流, 速い中間流に相当する斜面流は洪水流出解析法の代表的なモデルで

ある雨水流モデルを適用しようとする流出モデルである。

このモデルにおいて, 斜面流に關与する降雨分, すなわち有効降雨は以下のような手順で算定する。i) 降雨遮断を式(1)の形で考え, 降雨遮断効果を受けた後の降雨量 r_a を算定する。ii) r_a より地表面凹地貯留量を差し引き, r_e とする。iii) 第1段タンク下層への浸透量 f を算定すると, $r_e - f$ の値が斜面流への有効降雨量 r_s となる。

このように斜面流への有効降雨量 r_s が算定されると, 雨水流モデルを適用し, 表面流出高, 中間流出高を求めることが可能となる。

斜面流を表面流のみとした表面流型雨水流モデルにおける斜面流の基礎式は以下のとおりである。

$$h = kq_s^p \quad \dots\dots\dots(45)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = r_s \quad \dots\dots\dots(46)$$

ここに, h : 表面流の水深, q_s : 斜面単位幅流量, r_s : 有効降雨強度, t : 時間, x : 距離, k : 斜面流定数で $k = (N/\sqrt{s})^p$, N : 斜面の等価粗度, s : 斜面勾配, $p=3/5$ 。

また斜面の流れをすべて Darcy 型中間流とする中間流モデルを適用する場合, (45)式の k は $k=1/(k_t \cdot s/\lambda)$, $p=1$ となる。ここに, k_t : 表層土の透水係数, λ : 表層

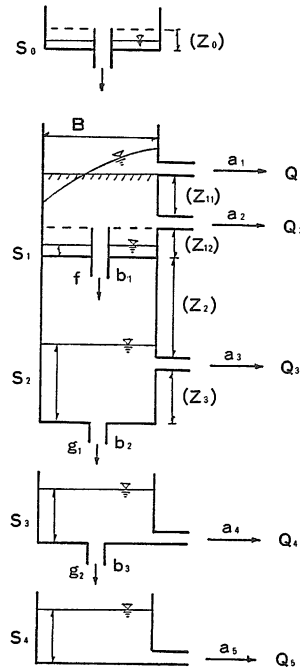


図5 流出モデル III

の有効間隙率。また表層内の見かけの水深を H とすると、(45)、(46)式の h は λH で置き換えられる。

雨水流モデルによる流出解析ではさらに、斜面域の表層厚 D を与え、 $H > D$ のとき表面流が発生するという中間流・表面流複合モデルを適用する場合もある。

図5に示す流出モデルⅢにおいて、 Q_1 は表面流出高、 Q_2 は中間流出高を表わす。そこで、(45)、(46)式を基礎式とする表面流型雨水流モデル、ないし Darcy 型中間流モデルにより斜面末端における流量 q_s を算定し、ついで(48)式の関係を利用して、流出高 Q_1 、ないし Q_2 に換算する。

一方、遅い中間流出高 Q_3 、地下水流出高 Q_4 、 Q_5 は角屋・永井法により算定しておくこと、各流出成分の和 $\sum_{i=1}^5 Q_i$ として各時刻の流出高を求めることができる。

なお、雨水流モデルのモデル定数 k 、 $k_I s/\lambda$ 、 λD が図5に示す流出モデルⅢではそれぞれ a_1 、 a_2 、 z_{11} で表示してある。

3. 流出シミュレーションによる検討

前述 2. において、角屋・永井法の長短期流出両用モデルを基礎にしつつ、洪水ピーク部の再現性に改良の余

地がないかについて検討するための3種の流出モデルを提示した。以下これらの流出モデルによる流出特性について若干の検討結果を述べる。なお、入力に用いた降雨波形は実流域での観測値である。また、いずれも流域面積 $A=1\text{km}^2$ 、平均斜面長 $B=500\text{m}$ とした計算例である。

3.1 流出モデルⅠ、Ⅱによる流出シミュレーション

まず、流出モデルⅠによる流出特性について述べる。流出計算に用いるモデルを図6に示す。

図7は第1段タンク上層部の分割比 β による流出波形への影響を調べるため、 β を 0.0、0.5、0.9 と変化させたときの流出量ハイドログラフを比較したものである。なお、同図の上部に入力降雨としたハイドログラフが示してある。以下の流出計算例はすべて、この降雨波形を与えたものである。

本流出モデルで $\beta=0$ 、 $z_{13}=0$ とすれば、角屋・永井法の長短期流出モデルに帰着する。むろん、各段タンクの初期貯留量によって、ハイドログラフの立上り部が異なるが、このように、同一の初期貯留量のもとでも、 β の値が大きいほどピーク流量が大となり、ハイドログラフ立上り部はより急激な流出量の増加傾向がみられ、ハイドログラフの低減部でも早い低減特性となっている。これらのハイドログラフの変化特性は流域地表面の不浸透域の比率が増大する

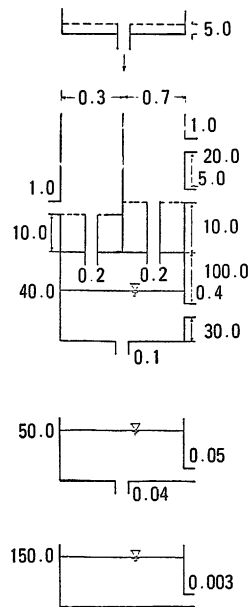


図6 流出モデルⅠのモデル定数

図7 模擬降雨による流出シミュレーション (流出モデルⅠ)

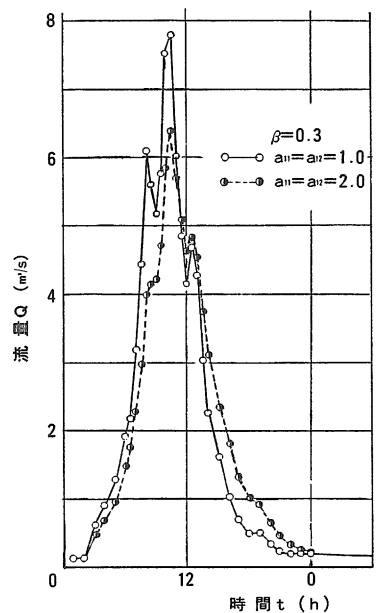
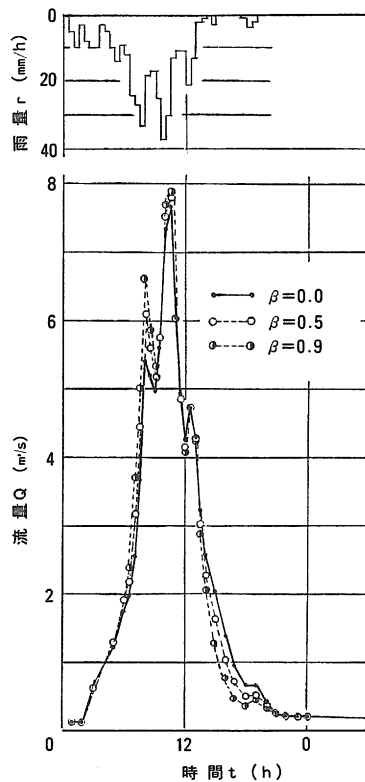


図8 模擬降雨による流出シミュレーション (流出モデルⅠ)

につれ、中間流出成分が減少し、表面流出が卓越することが反映した結果といえる。また、図8は表面流モデルの斜面流定数 k に相当する a_{11} , a_{12} の値により、流出波形がどのように変わるかを比較しようとしたものである。 a_{11} , a_{12} の値が変わることは土地利用形態が変化し、地表面流に対する抵抗則への影響がもたらされることに対応している。同図に示すように、 a_{11} , a_{12} の値が大きくなるほど、流出波形はより緩和された形状となることが指摘できる。表1は、 $\beta=0.0, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ とした場合のピーク流量の値を比較したものである。

次に流出モデルIIについての計算例を示す。

図9は β の値は一定とし、流域斜面域の分割比 γ_1 , γ_2 , γ_3 による流出波形への影響を概観しようとした計算例である。ここでは $\beta=0.3$ と固定し、i) $\gamma_1=0.5$, $\gamma_2=0.3$, $\gamma_3=0.2$, ii) $\gamma_1=0.3$, $\gamma_2=0.5$, $\gamma_3=0.2$, iii) $\gamma_1=0.2$, $\gamma_2=0.3$, $\gamma_3=0.5$, と斜面域を3つのタイプに分割した場合についての比較例である。

この計算例では、顕著な差異はないが、上部よりも中部および下部斜面域の面積比が増大するにつれ、ピーク流量は増大し、ハイドログラフ立上り部の流量も大きくなる傾向が認められる。また、流出モデルIによる流出波形に比較すると、ピーク流量発生時刻は同じであるが、ハイドログラフ立上り部、低減部とも流出モデルIIによる流出が、より緩和される傾向となっている。これはいわゆる流域内の貯留効果が、より反映した流出モデル構造となっているためである。そして図7, 8では3つの出水ピーク部が発生していたのに対し、本計算例では、図7, 8の第1および第3番目のピーク部が消滅傾向にあり、単峰型の出水波形に変化していることが指摘される。

図10は $\beta=0.3$, $\gamma_1=0.2$, $\gamma_2=0.3$, $\gamma_3=0.5$ とし、 a_{11} ,

表1 モデル定数とピーク流量 (流出モデルI)

No.	モデル定数		ピーク流量
	a_{11}, a_{12}	β	Q_p (m ³ /s)
I-1	1.0	0.0	7.675
I-2	1.0	0.3	7.749
I-3	1.0	0.5	7.798
I-4	1.0	0.7	7.847
I-5	1.0	0.9	7.896
I-6	2.0	0.0	6.034
I-7	2.0	0.3	6.261
I-8	2.0	0.7	6.412
I-9	2.0	0.5	6.564
I-10	2.0	0.9	6.715

および a_{12} の値が 2.0 から 1.0 に変化した場合のハイドログラフの形状変化をみようとしたものである。

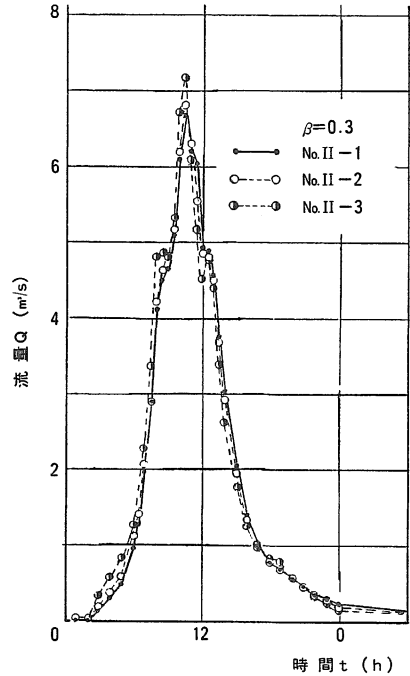


図9 模擬降雨による流出シミュレーション (流出モデルII)

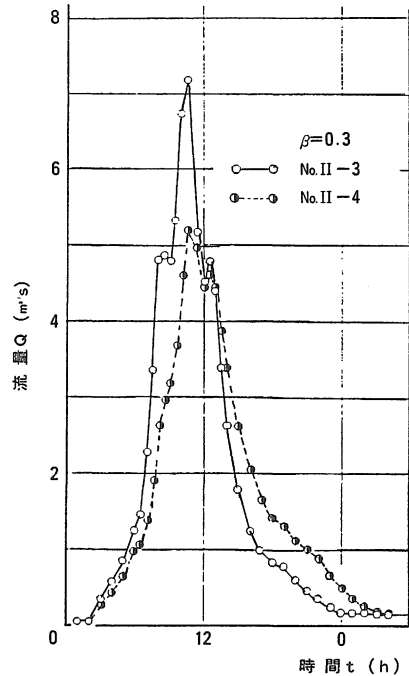


図10 模擬降雨による流出シミュレーション (流出モデルII)

図10の結果は図8と同様な傾向が指摘できるが、図10の方がより顕著なハイドログラフの偏平化傾向にあるといえる。表2はこれら流出モデルIIによる計算例より、ピーク流量についてまとめたものである。いずれの場合も表1に示す値よりかなり小さくなっている。

以上図7～10に示す計算例における各段タンクの初期貯留量は図6に示す値を用いた。流出モデルIIでは斜面方向に貯留量の傾斜分布を与えることが可能である。そこで表3に示すように下部斜面域ほど初期貯留量が多く、かつ、初期貯留量が大幅に異なる2つのケースについて流出計算を試みる。

図11にその結果を示す。これはいずれも $\beta=0.3$, $\gamma_1=0.2$, $\gamma_2=0.3$, $\gamma_3=0.5$ とし、初期貯留量のみ表3のように大きく異なる2つのケースについての計算例である。表2のNo. II-8, 9の値がそれぞれのピーク流量である。表2のNo. II-3のピーク流量と比較しても明らかに、同一の流出モデルでも初期貯留量により、ピーク流量の値は変化し、ハイドログラフ立上り部、低減部に図11に示すような初期貯留量の差異に起因する影響があらわれる。流域の山腹下部斜面域は、土壌の湿潤度がより高く、中間流出、表面流出の発生しやすい領域と考えられる。流出モデルIIはこうした特性を初期貯留量に組み入れて解析することが可能なモデルといえよう。

表2 モデル定数とピーク流量 (流出モデルII)

No.	モデル定数					ピーク流量 $Q_p(m^3/s)$
	a_{11}, a_{12}	β	γ_1	γ_2	γ_3	
II-1	1.0	0.3	0.5	0.3	0.2	6.700
II-2	1.0	0.3	0.3	0.5	0.2	6.792
II-3	1.0	0.3	0.2	0.3	0.5	7.187
II-4	2.0	0.3	0.2	0.3	0.5	5.210
II-5	1.0	0.9	0.5	0.3	0.2	6.909
II-6	1.0	0.9	0.3	0.5	0.2	6.992
II-7	1.0	0.9	0.2	0.3	0.5	7.366
II-8	1.0	0.3	0.2	0.3	0.5	6.933
II-9	1.0	0.3	0.2	0.3	0.5	7.291

表3 初期貯留量 (流出モデルIII)

No.	i	$S_{0,i}$	$S_{11,i}$	$S_{12,i}$	$S_{2,i}$	$S_{3,i}$	$S_{4,i}$
II-8	1	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	50.0
	2	0.0	0.0	0.0	0.0	30.0	150.0
	3	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0	250.0
II-9	1	0.0	3.0	3.0	10.0	50.0	150.0
	2	0.0	5.0	5.0	30.0	150.0	450.0
	3	0.0	8.0	8.0	50.0	250.0	750.0

3.2 流出モデルIIIによる流出シミュレーション

図12は断続的に3つの降雨波形が連続する降雨パターンについて、流出モデルIIIで流出計算した例である。図12には、i) 全流出成分の和 $\sum_{i=1}^5 Q_i$, ii) 表面流出 Q_1 , および iii) 遅い中間流出と地下水流出の和 $\sum_{i=3}^5 Q_i$ のそれぞれ流出量ハイドログラフが示されている。通常、こうした複数のピーク部をもつ降雨パターンに対し、観測される流出量ハイドログラフも複峰型となることが多い。そして、このような出水を対象に流出解析する場合、地下水流出量の分離、および有効降雨の推定に個人誤差が入りやすいという難点がある。

しかし雨水流モデルと角屋・永井法の長短期流出両用モデルを併合したモデルである流出モデルIIIでは、直接流出および低水流出への有効降雨が自動的に算定されるためその難点が取り除かれている。そして、このような降雨パターンに対し、地下水流出も図12のような3つのピーク部をもつ流出形態を示している。観測流出量ハイドログラフから、このような複峰型の地下水流出を合理的に分離することは非常に困難である。その点本流出モデルには補給能モデルと等価な低水流出解析を可能とした角屋・永井法の長短期流出両用モデルの特徴がそのまま組み入れてあるため、地下水流出もより精度よく推定がなされていると判断される。

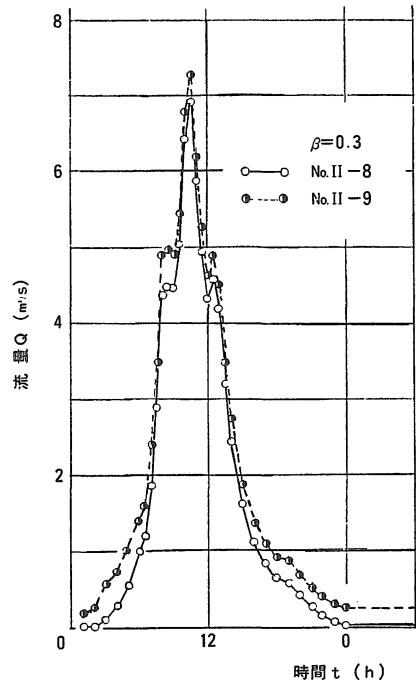


図11 模擬降雨による流出シミュレーション (流出モデルII)

なお、本流出計算には図13に示すモデル定数を用いた。

本流出計算で算定される有効雨量と観測降雨とから、流域の雨水保留量を逆算し、いわゆる雨水保留量曲線を描くと図14のようになる。

雨水保留量曲線の作成には角屋の改善法を適用することにより、出水ピーク部の有効降雨は従来より合理的に

算定しうようになったが、ハイドログラフ立上り部を形成する有効降雨、および複数の出水ピーク部分に關与する有効降雨についての合理的な推定は依然として検討課題となっている。

図14に示す保留量曲線は従来の保留量曲線とは非常に異なった変化特性がみられる。特に、少雨時の保留量の変化特性は従来推定困難であったが、図14ではその変化

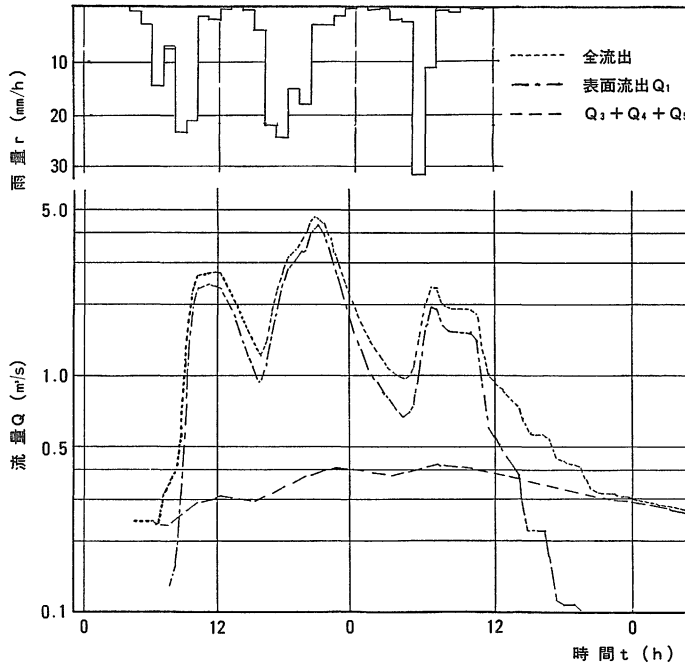


図12 流出モデルⅢによる解析例

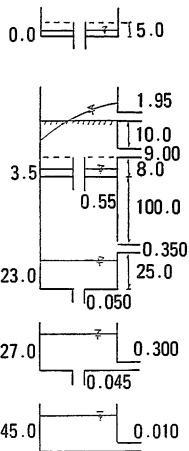


図13 流出モデル定数 (流出モデルⅢ, B=500m)

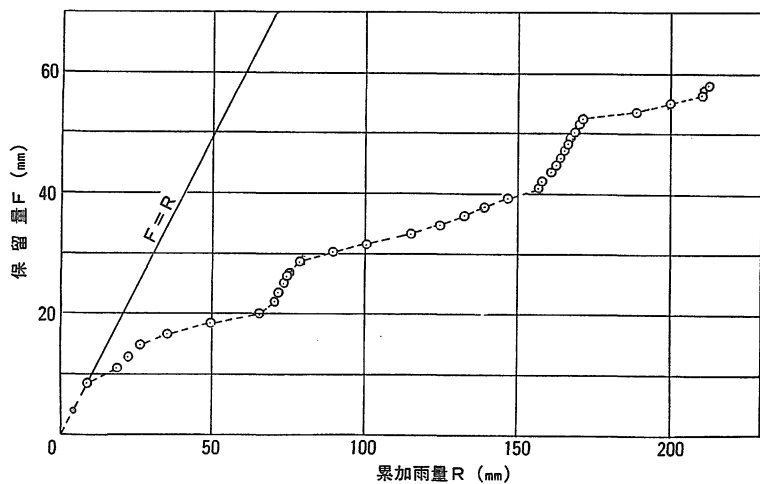


図14 雨水保留量曲線

特性が十分表現されているといえる。

したがって、長時間にわたる断続的な降雨波形に対しても、本流出モデルで十分精度よく、斜面流への有効降雨を推定し得るものと期待される。

しかし、実流域における本流出モデルの適応性については今後の検討課題である。

4. あとがき

本報告では、角屋・永井法の長短期流出両用モデルを基礎にしながら、i) 洪水ピーク部の再現性に改良の余地がないか、ii) 本流出モデルで自動的に振り分けられる表面流出、早い中間流出の両流出成分についての有効降雨を推定することにより、雨水流モデルのモデル定数が評価できないかについて検討するための流出モデルを提示した。ここに提示した3種の流出モデルはいずれも角屋・永井法の流出モデルの特徴を生かした流出モデルである。すなわちi) 流域内の浸透域、不浸透域の面積割合をモデルに組み入れ、表面流出の生起場の拡大も考慮できるモデル(流出モデルⅠ)、ii) 前述i)のモデルを並列に配列し、降雨波形および出水規模により流域斜面部における表面流出、中間流出の生起場の時間的変化、あるいは流域斜面上、中、下部域の土壌水分形態の差異を考慮できるモデル(流出モデルⅡ)、iii) 角屋・永井法のモデルにおいて、最上段の降雨遮断タンク、および第1段タンク下層部、第2～3段タンクはそのまま利用し、それら各タンクからの流出高を求め、表面流、速い中間流に相当する斜面流は、雨水流モデルを適用しようとするモデル(流出モデルⅢ)の3種であった。これらの流出モデルは角屋・永井法と同様にいずれも流出モデル構造に Horton 型の浸透能が組み込まれ、補給能モデルと等価な低水流解析が可能となっている。

ここではこれら3種の流出モデルよりの流出特性を模擬降雨ないし観測降雨を与えての数値シミュレーションによる検討結果を示すにとどまった。しかし、これらの流出シミュレーション結果より当初意図した、i) 洪水

ピーク流出部の再現性、ii) 有効降雨の推定法に関しての検討に有用な手掛りを得た。3種の流出モデルのうち、特に流出モデルⅢは代表的な洪水流出解析法である雨水流法と角屋・永井法の長短期流出両用モデルを基礎にした低水流解析法が統合された流出モデル構造となっているため、今後、実流域での適応性が期待できる。事実、流出モデルⅢで評価される有効降雨から算定した雨水保留量曲線により、従来の手法では評価され難かった小雨時の流域保留量の変化特性を表現しうることが指摘できた。この結果、本流出モデルを実流域に適用することにより、断続的、かつ複峰型の降雨波形についても有効降雨を合理的に推定しうる可能性がでてきたことは注目される。

最後に、本研究を着手する契機ならびに適切な御指導を賜った京都大学防災研究所角屋睦教授、および流出計算等に協力を賜った農業水利工学専攻生坂本智(現、島根県農林水産部)、渡辺昌明(現、熊本県農政部)に深甚なる感謝の意を表する次第である。

なお、本報告は昭和59、60年度文部省科学研究費による研究成果の一部であり、また数値解析には島根大学電子計算センター FACOM 140-F システムを用いたことを付記する。

参 考 文 献

1. 永井明博・角屋 睦：京大防災研年報，26(B-2)：261-272，1983.
2. 角屋 睦・永井明博・塚本浩二：昭和59年度農土講要旨集，190-191，1984.
3. 角屋 睦・永井明博：昭和58年度日本農土総研報告書，27-42，1984.
4. 角屋 睦・田中丸治哉・米田達也：昭和60年度農土講要旨集，148-149，1985.
5. 福島 辰・田中礼次郎：島大農研報，19：77-86，1985.