

## 遅延入力降雨系列を用いた貯留分布型流出モデル

福島 晟・武田育郎

### A Storage-Based, Distributed Runoff Model using the Delayed Input Rainfall Sequences

Akira FUKUSHIMA and Ikuo TAKEDA

**Abstract** Under conditions of the developing radar hydrology, It has become possible to construct a distributed runoff model by using the rader mesh rainfall information. In this study, a storage-based, disitributed runoff model is developed by the modified model based on the Long-and Short-Terms Runoff Model( LST- II ) which is developed by Kadoya and Nagai( 1988 )for analyzing both flood and long term runoff successively. The routine phase of rainwater flow on hillslope is expressed by the series of modified LST- II model. At each zone divided the slope system, the modified radar mesh data by radar rainfall measurement system are supplied as input series to the runoff model, in which the input rainfall series are converted to the delayed rainfall sequences by applying the concept of lag time reflecting the concentration time of flood wave. Even if the radar mesh data are not observed, the observed ground rainfall data in the watershed are converted to mesh data on the plane constructed by triangle network. It is possible to apply the distributed runoff model to the runoff analysis reflecting the effect of a spatially distribution characteristics of storm rainfall in a watershed.

Key words: distributed runoff model, runoff analysis, lag time

### まえがき

今日、レーダ雨量計情報の提供により、流域内の時空間的降雨分布状況が的確に把握できる状況となった。そこで、レーダ雨量計データを貯留分布型流出モデルへの入力降雨情報として利用できるように、貯留集中型流出モデルを拡張した貯留分布型流出モデル構成による流出解析法の提示を試みることにする。本報告では、流域内の空間的降雨分布特性及び出水の遅れ時間が流域のモデリングスケールとの関連で流出波形にどの程度影響しているのかについての評価が可能な貯留分布型流出モデルを構築することを基本目的とした検討について述べる。

### 1. 貯留集中型流出モデル

図 - 1 は農地造成畑地域に適用することを意図して提案した流出モデルで、角屋・永井の長短期流出両用モデル<sup>1)</sup>を基礎にした貯留型流出モデルである<sup>2)</sup>。なお、図 - 1 に示す流出モデルは以下のようなモデル構成となっている。

まず、本流出モデルには造成畑地における 24 時間容水量と等価な表層土壌の保水量ないし流域表層部の雨水保留量が組み入れてある。一般に、流域表層部の土層は、その堆積環境に応じた層構造を有しているが、ここでは流域表層部が上下 2 層からなる成層構造を形成しているものとしてモデル化してある。図中で  $L_1, L_2$  は、それぞれ流域表層部の上下 2 層における最大雨水保留量を水深に換算した土層厚さを示し、次式の関係が近似的に成立するものとしている。

$$L_1 = Z_{11} + Z_{12} = \alpha \theta_{SU} \cdot D_1 / 100 \dots\dots\dots (1)$$

$$Z_{12} = \theta_{FU} \cdot D_1 / 100 \dots\dots\dots (2)$$

$$L_2 = Z_2 + Z_3 = \alpha' \theta_{SL} \cdot D_2 / 100 \dots\dots\dots (3)$$

$$Z_3 = \theta_{FL} \cdot D_2 / 100 \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $D_1, D_2$  : 表層土の上部及び下部それぞれの土層厚さ (mm),  $\theta_{SU}, \theta_{SL}$  : 表層土の上部及び下部それぞれの飽和水分量 (容積含水率, %),  $\theta_{FU}, \theta_{FL}$  : 表層土の上部及び下部それぞれの 24 時間容水量 (容積含水率, %),  $Z_{11}, Z_{12}, Z_2, Z_3$  : 流出孔の高さ (mm),  $\alpha, \alpha'$  : 定数である。その他の記号は長短期流出両用モデル LST- II と同一とする。ただし、ここでは、流域地表面における窪地貯留高

$Z_s$ , 浸入能  $f_s$  の導入, 及び浸透高  $g_1$  の算定式が LST-II モデルと異なっている.

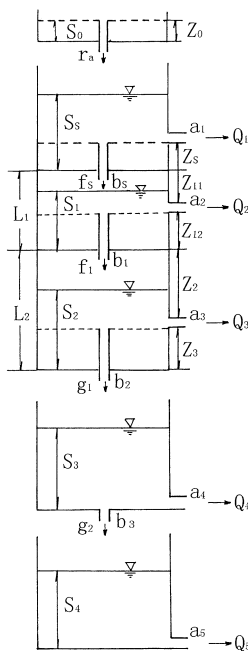


図 - 1 貯留集中型流出モデル (LST-II モデルの応用モデル)

図 - 1 に示す流出モデルによる流出高, 浸入能, 浸透高及び各タンクの連続の式は以下のように表される.

流出高:

$$Q_1 = a(S_5 - Z_s) \quad (\text{for } S_5 > Z_s) \dots\dots\dots (5)$$

$$Q_2 = a(S_1 - Z_{12}) \quad (\text{for } S_1 > Z_{12}) \dots\dots\dots (6)$$

$$Q_3 = a(S_2 - Z_3) \quad (\text{for } S_2 > Z_3) \dots\dots\dots (7)$$

$$Q_4 = a_4 S_3 \dots\dots\dots (8)$$

$$Q_5 = a_5 S_4 \dots\dots\dots (9)$$

浸入能:

$$f_s = b(Z_{11} + Z_{12} - S_1) \quad (\text{for } S_5 > Z_s) \dots\dots\dots (10)$$

$$f_1 = b(Z_2 + Z_3 - S_2) \quad (\text{for } S_1 > Z_{12}) \dots\dots\dots (11)$$

浸透高:

$$g_1 = b(S_2 - Z_3) \quad (\text{for } S_2 > Z_3) \dots\dots\dots (12)$$

$$g_2 = b_3 S_3 \dots\dots\dots (13)$$

連続の式:

$$dS_5/dt = r_a - Q_1 - f_s \dots\dots\dots (14)$$

$$dS_1/dt = f_s - Q_2 - f_1 \dots\dots\dots (15)$$

$$dS_2/dt = f_1 - Q_3 - g_1 \dots\dots\dots (16)$$

$$dS_3/dt = g_1 - Q_4 - g_2 \dots\dots\dots (17)$$

$$dS_4/dt = g_2 - Q_5 \dots\dots\dots (18)$$

ここに,  $Q_1 \sim Q_5$ : 流出高 (mm/h),  $Q_1$  は表面流出,  $Q_2$  は速い中間流出,  $Q_3$  は遅い中間流出,  $Q_4$  と  $Q_5$  は地下水流出を想定する.  $S_5 \sim S_4$ : 貯留量 (mm),  $a_1 \sim a_5$  及び  $b_5 \sim b_3$ :

定数,  $Z_s \sim Z_3$ : 流出孔の高さ (mm),  $f_s$  及び  $f_1$ : 浸入能 (mm/h),  $g_1$  及び  $g_2$ : 浸透高 (mm/h),  $t$ : 時間である.

なお, 貯留量  $S_1$  と流出孔の高さ  $Z_{12}$  及び  $S_2$  と  $Z_3$  の大小関係の組み合わせは4ケース (①  $S_1 > Z_{12}, S_2 > Z_3$ , ②  $S_1 > Z_{12}, S_2 < Z_3$ , ③  $S_1 < Z_{12}, S_2 > Z_3$ , ④  $S_1 < Z_{12}, S_2 < Z_3$ ) がある. この内, ①  $S_5 > Z_s, S_1 > Z_{12}$  のケースで上層に  $f_s$  あるいは  $f_1$  に見合うだけの十分な貯留量がある場合, 浸入能  $f_s$  及び  $f_1$  の時間的变化は, Hortn の浸入能式と同形の次式で与えられる.

$$f_s = f_{sc} + \gamma \cdot \exp(-ct) + (f_{s0} - f_{sc} - \gamma) \cdot \exp\{- (b_s + a_2)t\} \dots\dots\dots (19)$$

$$f_1 = f_c + (f_0 - f_c) \cdot \exp(-ct) \dots\dots\dots (20)$$

ここで,  $f_{sc} = b_3(a_2 Z_{11} + f_c) / (b_s + a_2)$

$$\gamma = b_3(f_0 - f_c) / (b_s + a_2 - c)$$

$$f_c = b_1 Z_3 / c, c = a_3 + b_1 + b_2,$$

$f_{s0}$  及び  $f_0$  は, それぞれ  $t=0$  のときの  $f_s$  及び  $f_1$  の値.

図 - 1 に示す流出モデルにおいて, 浸入能  $f_s$  の上限値  $f_{SM}$ , 最終値  $f_{SL}$  は, 次式で与えられる.

$$f_{SM} = b(Z_{11} + Z_{12}) \dots\dots\dots (21)$$

$$f_{SL} = b_3(a_2 Z_{11} + f_c) / (b_s + a_2) \dots\dots\dots (22)$$

また, 浸入能  $f_1$  の上限値  $f_{1M}$ , 最終値  $f_{1L}$  は 次式で与えられる.

$$f_{1M} = b(Z_2 + Z_3) \dots\dots\dots (23)$$

$$f_{1L} = f_c = b_1 Z_3 / c \dots\dots\dots (24)$$

一方, 貯留量  $S_1$  及び  $S_2$  の上限値  $S_{1M}, S_{2M}$  は次式で与えられる.

$$S_{1M} = (f_{SM} - f_{SL}) / b_s \dots\dots\dots (25)$$

$$S_{2M} = (f_{1M} - f_{1L}) / b_1 \dots\dots\dots (26)$$

そして, この  $S_{1M}, S_{2M}$  を用いると,  $Q_2, Q_3, g_1$  の最大値  $Q_{2M}, Q_{3M}, g_{1M}$  は (27) ~ (29) 式で与えられ, これらは  $f_{SL}, f_{1L}$  と (30), (31) 式の関係にある.

$$Q_{2M} = a(S_{1M} - Z_{12}) \dots\dots\dots (27)$$

$$Q_{3M} = a(S_{2M} - Z_3) \dots\dots\dots (28)$$

$$g_{1M} = b(S_{2M} - Z_3) \dots\dots\dots (29)$$

$$f_{SL} = Q_{2M} + f_{1L} \dots\dots\dots (30)$$

$$f_{1L} = Q_{3M} + g_{1M} \dots\dots\dots (31)$$

なお, 図 - 1 の最上段のタンクは, LST-II モデルで採用されている樹木等による降雨遮断タンクを意味している. また流域からの蒸発散量は LST-II モデルでの算定方式を用い, 実際の流出計算においては, 各段タンクの連続的に蒸発散に伴う貯留量の減少強度を組み込むこととする.

## 2. 貯留分布型流出モデル

貯留集中型流出モデルによる流出解析法を適用しても、実用的精度で観測流出ハイドログラフが再現できることが実証されているが、その際、観測流出量ハイドログラフの再現性の向上には、流域面積及び出水規模に応じた遅れ時間の導入が必要とされている。したがって、貯留集中型流出モデルを拡張した貯留分布型流出モデルにおいても、モデル構造による貯留効果のみでは実際の出水現象を十分再現できないことが予想されるので、遅れ時間の評価手法を検討する余地があると考えられる。

図 - 1 の流出モデルを拡張した貯留分布型流出モデルとして、図 - 2 に示すような流出モデルを設定する。本流出モデルは、図 - 1 の流出モデルを連結し、流域斜面部の雨水伝播過程を表現しようとしたものであり、図 - 2 では図 - 1 の流出モデルの第 1 段タンク上層部を 5 個連結した場合のモデル構造となっている。

なお、第 1 段タンク下層部及び第 2, 3 段タンクは図 - 1 に示すモデル構造をそのまま利用している。そして、流域斜面部を  $j$  方向、河道部を  $i$  方向とし、第  $i$  番目ブロックが、 $j_n$  個の単位流域で構成されるものとする、流域特性に応じた分布型流域モデルを構成することができる。

また、第  $i$  ブロックの第  $j$  番目の単位流域の集水面積を  $A_{ij}$  とし、入力降雨系列は、各単位流域ごとに入力するものとする。

図 - 2 に示す流出モデルによる第  $i$  ブロックの第  $j$  番目の単位流域における流出高、浸入能、浸透高及び各タンクの連続の式は以下のように表される。

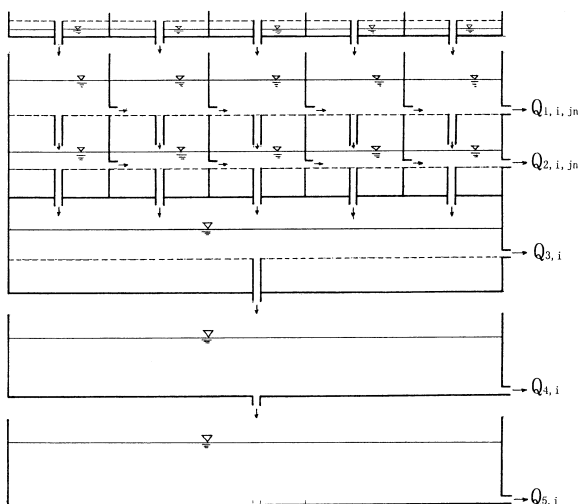


図 - 2 貯留分布型流出モデル  
(第  $i$  番目ブロック,  $j_n = 5$ )

流出高：

$$Q_{1ij} = a_1(S_{s,ij} - Z_s)^n \quad (\text{for } S_{s,ij} > Z_s) \dots\dots\dots (32)$$

$$Q_{2ij} = a_2(S_{1ij} - Z_{12}) \quad (\text{for } S_{1ij} > Z_{12}) \dots\dots (33)$$

$$Q_{3j} = a_3(S_{2j} - Z_3) \quad (\text{for } S_{2j} > Z_3) \dots\dots (34)$$

$$Q_{4j} = a_4S_{3j} \dots\dots\dots (35), \quad Q_{5j} = a_5S_{4j} \dots\dots\dots (36)$$

浸透能：

$$f_{s,ij} = b_1(Z_{11} + Z_{12} - S_{1ij}) \quad (\text{for } S_{s,ij} > Z_s) \dots\dots\dots (37)$$

$$f_{1j} = b_2(Z_2 + Z_3 - S_{2j}) \quad (\text{for } S_{1ij} > Z_{12}) \dots\dots\dots (38)$$

浸透高：

$$g_{1j} = b_3(S_{2j} - Z_3) \quad (\text{for } S_{2j} > Z_3) \dots\dots (39)$$

$$g_{2j} = b_4S_{3j} \dots\dots\dots (40)$$

連続の式：

$$dS_{s,ij}/dt = r_{a,ij} - Q_{1ij} - f_{s,ij} + Q_{1ij-1} \times A_{ij-1} / A_{ij} \dots (41)$$

$$dS_{1ij}/dt = f_{s,ij} - Q_{2ij} - f_{1j} + Q_{2ij-1} \times A_{ij-1} / A_{ij} \dots (42)$$

$$dS_{2j}/dt = \sum \alpha_i f_{1ij} - Q_{3j} - g_{1j} \dots\dots\dots (43)$$

$$dS_{3j}/dt = g_{1j} - Q_{4j} - g_{2j} \dots\dots\dots (44)$$

$$dS_{4j}/dt = g_{2j} - Q_{5j} \dots\dots\dots (45)$$

ここに、 $Q_{1ij} \sim Q_{5j}$ ：流出高 (mm/h)、 $Q_{1ij}$  は表面流出、 $Q_{2ij}$  は速い中間流出、 $Q_{3j}$  は遅い中間流出、 $Q_{4j}$  と  $Q_{5j}$  は地下水流出を想定する。 $S_{s,ij} \sim S_{4j}$ ：貯留量 (mm)、 $a_1 \sim a_5$  及び  $b_1 \sim b_4$ ：定数、 $Z_s \sim Z_3$ ：流出孔の高さ (mm)、 $f_{s,ij}$  及び  $f_{1j}$ ：浸入能 (mm/h)、 $g_{1j}$  及び  $g_{2j}$ ：浸透高 (mm/h)、 $t$ ：時間である。また、 $\alpha_i = A_{ij} / A_i$ 、第  $i$  ブロックの集水面積  $A_i = \sum A_{ij}$  である。

なお、第  $i$  ブロックが  $j_n$  個の単位流域で構成されるとき、第  $i$  ブロック最下流端の単位流域、すなわちを第  $j_n$  番目の単位流域からの流出量  $Q$  ( $m^3/s$ ) は、次式で与えられる。

$$Q = \{ (Q_{1ij_n} + Q_{2ij_n}) \times A_{i,j_n} + (Q_{3j} + Q_{4j} + Q_{5j}) \times A_i \} / 3.6 \dots\dots\dots (46)$$

ここに、 $A_{i,j_n}$  は、第  $i$  ブロックの第  $j_n$  番目の単位流域の面積である。

なお、河道部は、雨水流法における河道流計算手法を適用することとする。その際、第  $i$  ブロック河道への斜面域からの横流入量  $q$  ( $m^2/s$ ) は、次式で算定される。

$$q = Q / L_i \dots\dots\dots (47)$$

ここに、 $L_i$ ：第  $i$  ブロックの河道長 (m)

## 3. 分布型流域モデル

貯留分布型流出モデルを適用する際には、予め斜面系と河道系から構成される分布型流域モデルを以下のように設定しておく。

レーダによる観測降雨情報の提供の際に設定される  $1.5 \text{ km} \times 1.5 \text{ km}$  メッシュ、 $2.5 \text{ km} \times 2.5 \text{ km}$  メッシュ、あるいは

は5km×5kmメッシュのいずれかで解析対象流域を分割し、1メッシュ分を囲まれた領域を1セルとする。

次いで、解析対象流域のメッシュ図上で河道部を抽出し擬似河道網を設定する。そして、ここでは、分布型流出モデルに反映させる斜面系及び河道系として、次の評価法を適用する。

まず、国土地理院発行の地形図等に記載の河道網、または一定の基準で評価された河道網を河道次数の概念を用いて次数化する。次いで、前述のように、ある次数の集水域を単位流域として流域分割するとともに、各ブロック斜面域を上述の流域メッシュスケールを勘案しながら1~複数個の領域に分割する。また、各ブロックを河道長に応じてさらに上流、中流、下流部の3分割、あるいは上流、下流部の2分割して構成される分布型流域モデルを図-3のように設定する。この流域モデルは、雨水流モデルで通常設定される流域モデルと比較し、流域内のよりきめ細かな時空間的降雨分布特性を分布型流出モデルに反映させることが可能となる。

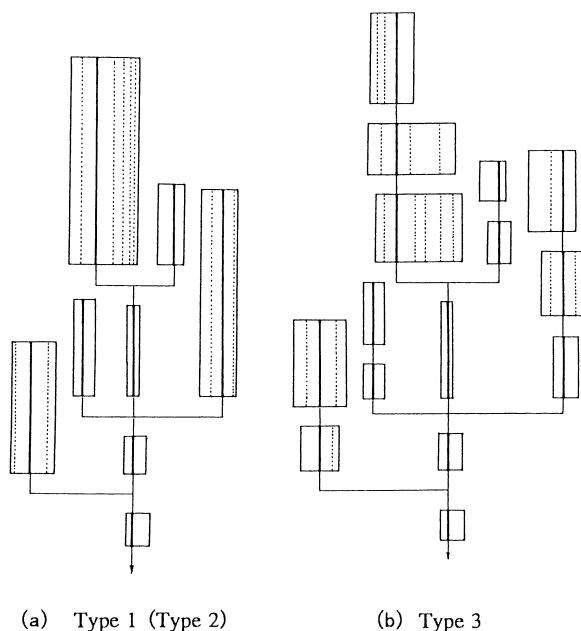


図-3 分布型流域モデルの一例  
(斐伊川水系大津集水域)

#### 4. 流出モデルへの遅延入力降雨系列

前述3.の分布型流域モデルの各ブロック斜面域の区分領域毎の入力降雨系列として、①当該領域内に包含されるレーダメッシュ雨量の平均値、または②転倒ます型雨量計による地点観測雨量データを利用して算定した当該領域内に包含される流出計算単位時間毎のメッシュ雨量

値を用いる。

レーダ雨量計によるレーダメッシュ雨量値をメッシュ直下の単独の地上転倒ます型雨量計による時間雨量値と比較した場合、平均雨量値に対して、±50%程度の平均的な差異を有しているのが一般的とされている<sup>3)</sup>。したがって、現時点では、上述①の入力降雨系列にレーダメッシュ雨量値を用いた流出解析による計算流出量の評価精度に問題を含むことが予想される。

後者の②による降雨系列の算定手順は、以下の(i)~(iv)の手順により行う<sup>4)</sup>。

(i) まず、対象流域をレーダ雨量情報が得られる領域と同じく、1.5km×1.5kmメッシュの方眼で覆う。

(ii) 図-4に示すように流域内で3地点以上の地点観測雨量データが得られる場合、隣接する雨量観測地点を互いに結ぶ直線によって三角網をつくり、流域を各三角形内の領域及び流域界で囲まれた三角網の周辺域に流域を分割する。

(iii) さらに、三角網の周辺域は、流域特性を考慮していずれかの三角形に付随するように領域区分する。

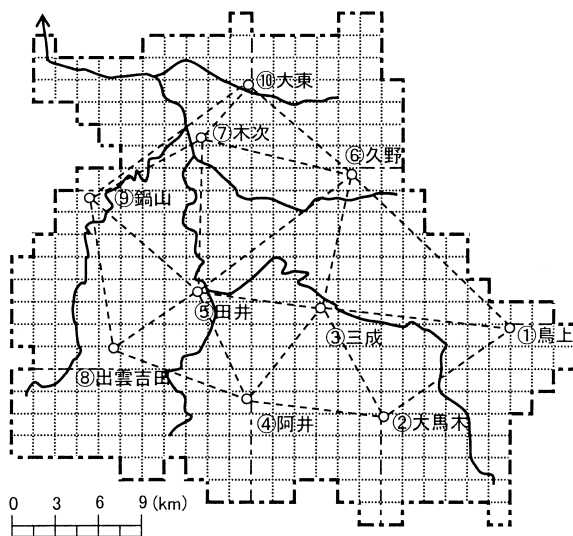


図-4 雨量観測点で構成される三角網と地域区分の一例  
(斐伊川水系大津集水域)

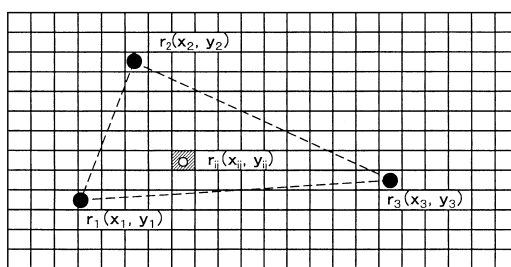


図-5 メッシュ雨量値  $r_i$  の算定

(iv) そして、図 - 5 に示すように、いま任意の三角形を構成する3地点  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$  の雨量を  $r_1, r_2, r_3$  とすれば、3地点で囲まれる領域内あるいは、その三角形に付随する周辺域内のメッシュ地点  $(x_{ij}, y_{ij})$  の雨量  $r_{ij}$  は、3点  $(x_1, y_1, r_1), (x_2, y_2, r_2), (x_3, y_3, r_3)$  を通る平面の方程式によって、次式で与えられるものとする。

$$r_{ij} = (a_1 r_1 + a_2 r_2 + a_3 r_3) a_0 \dots\dots\dots (48)$$

ここに、 $a_0 = x(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2)$ ,

$$a_1 = x_{ij}(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_{ij}) + x_3(y_{ij} - y_2)$$

$$a_2 = x_{ij}(y_3 - y_1) + x_2(y_{ij} - y_3) + x_3(y_1 - y_{ij}),$$

$$a_3 = x_{ij}(y_1 - y_2) + x_2(y_2 - y_{ij}) + x_3(y_{ij} - y_1)$$

(v) 分布型流域モデルの各区分斜面域への入力降雨系列は、各区分斜面域のメッシュ雨量  $r_{ij}$  の算術平均によって算定する。

ここで、洪水流出過程は流域に降った雨水の移動・伝播過程と理解し、巨視的観点から雨水の流出過程は斜面域における雨水から流出水への変換過程と河道系における流出水の伝播・変形過程とで表現されるものとする。すなわち、流域への入力降雨系列はこうした斜面域及び河道系における雨水伝播過程の特性を受けた後に、流域最下流端の流出高を形成することとなる。そこで、こうした遅れ過程を上述2.で示した貯留集中型流出モデルあるいは3.で示した貯留分布型流出モデルに取り込むために、次の仮定(a)~(d)が成立するものとして検討を進める。

なお、貯留集中型流出モデルでは、上述のメッシュ雨量値から算定される流域平均雨量系列が以下の手法により、遅延降雨系列に変換されたものを流出モデルへの入力降雨系列とする。また貯留分布型流出モデルでは、分布型流域モデルの各ブロック斜面域の区分領域毎のメッシュ雨量系列が以下の手法により、遅延降雨系列に変換され流出モデルへの入力降雨系列となる。

(a) 斜面域における雨水伝播過程に対する流域地形効果は斜面域の斜面長分布特性に集約できるものとする。そして、河道に付随する斜面域の斜面長  $B$  はガンマ分布で近似できるものとする。すなわち、次式で斜面長の分布関数が与えられるものとする。

$$F(B) = \frac{\lambda^n}{\Gamma(n)} \int_0^B \exp(-\lambda B) B^{n-1} dB \dots\dots\dots (49)$$

ここに、 $n$ ；形状母数、 $1/\lambda$ ；尺度母数。

(b) 洪水到達時間に関する角屋らの研究成果を利用し、最遠斜面から斜面最下流端部までの雨水伝播時間  $t_{ms}$ 、及び河道最上流端から河道最下流地点までの雨水流伝播時

間  $t_{mc}$  が、次式のように表現できるものとする。

$$t_{ms} = C_s \cdot A^{0.24} \cdot r^{-0.40} \dots\dots\dots (50)$$

$$t_{mc} = C_c \cdot A^{0.32} \cdot r^{-0.30} \dots\dots\dots (51)$$

ここに、 $C_s, C_c$ ：定数、 $A$ ：流域面積 ( $\text{km}^2$ )、 $r$ ：降雨強度 ( $\text{mm/h}$ )。ただし、貯留分布型流出モデルの場合、 $A$  は斜面域の各単位流域の集水面積  $A_{i,j}$  とする。

(c) 河道から斜面に沿い距離  $B_0$  の斜面長と斜面域の雨水擾乱の伝播時間が1対1で対応するものとする。いま、河道から斜面に沿い距離  $B_0$  をとったとき、そこに含まれる斜面面積の流域面積に対する比率  $P(B_0)$  を求める。ここで、斜面長  $B_0$  と  $P(B_0)$  との関係を図示したものを集中斜面図と呼ぶことにする。なお、実際の流出計算に応用するに際し、(52)式で表される形状母数  $n$ 、尺度母数  $1/\lambda = 1$  とするガンマ分布の確率密度関数  $f(y)$  を利用して、 $F(B_0)$  に対応する  $W(y)$  の値を(53)式により算定しておく。

$$f_y(y) = \frac{1}{\Gamma(n)} \exp(-y) y^{n-1} \dots\dots\dots (52)$$

$$W(y) = \frac{1}{\Gamma(n)} \int_0^y \exp(-y) y^{n-1} dy + \sum_j \frac{y_0}{y_j \Gamma(n)} \int_{y_1}^{y_{j+1}} \exp(-y) y^{n-1} dy \dots\dots (53)$$

ここに、 $y = \lambda B, y_0 = \lambda B_0, y = Z_B, Z_B$  は形状母数  $n$ 、尺度母数  $1/\lambda = 1$  とするガンマ関数  $F_\lambda(y)$  の値が0.99999となる値とする。

(d) 分布型流域モデルの各ブロック斜面域に包含される低次の河道部における雨水擾乱の伝播時間の確率分布は、ガンマ分布で近似されるものとする。

流域モデルの各分割斜面領域へのメッシュ雨量系列は上述の(a)~(d)に示す仮定に基づく遅延効果を受けた降雨系列に変換した後、貯留分布型流出モデルへ入力し、次いで本流出モデル構造による貯留型変換過程を経て斜面域下流端の流出量が形成され、さらに河道網系における雨水伝播過程を経て流域最下流端での流出量となる。

以上の仮定のもとに、貯留集中型あるいは貯留分布型流出モデルへの遅延入力降雨系列の算定法を考えると以下のようなになる。いま、入力降雨単位時間を  $\Delta t$  とし、時刻  $t_{i-1} \sim t_i$  間の降雨強度を  $r_i$  とする。この  $r_i$  は、集中斜面長分布に対応した確率分布を有する遅れ時間の効果を受けて、河道に到達するものとする。すなわち、 $r_i$  を、雨水擾乱の集中時間を考慮した遅延作用素(重み関数)により、次式のような降雨系列  $r(j \cdot \Delta t)$  に変換する。

$$r(j \cdot \Delta t) = r_i \cdot \Delta W(t_s) \dots\dots\dots (54)$$

ここに、 $i = 1, 2, \dots, N, j = i, i+1, \dots, i+n_s - 1$ 、

$$n_s = t_{ms} / \Delta t, \Delta W(t_s) = W(y_s) - W(y_{s-1}), y_s = \alpha \cdot t_s,$$

$$\alpha = Z_B / t_{ms}, t_s = s \cdot \Delta t, (s = 1, 2, \dots, n_s).$$

次いで,  $r(j \cdot \Delta t)$  を, 河道系での伝播時間の確率分布に対応する遅れ時間の効果を受けた  $r(n \cdot \Delta t)_j$  に変換する. なお, この河道系での遅れ時間の確率分布は前述の仮定 (d) に示したようにガンマ分布で表現できるものとする.

$$r(n \cdot \Delta t)_j = r(j \cdot \Delta t) \cdot \Delta Y(t_k) \dots \dots \dots (55)$$

ここに,  $n = j, j+1, \dots, j+n_k, n_k = t_{mc} / \Delta t$ .

$\Delta Y(t_k) = F(t_k) - F(t_{k-1}), F(t_k) = \Gamma(n, y_k) / \Gamma(n)$ ,  
 $\Gamma(n, y_k) = \int_0^{y_k} \exp(-y) y^{n-1} dy$  で定義される不完全ガンマ関数,  $\Gamma(n)$  はガンマ関数である.  $y_k = \beta \cdot t_k, \beta = Z_B / t_{mc}, t_k = k \cdot \Delta t, (k = 1, 2, \dots, n_k + 1)$ .  $k \cdot \Delta t > t_{mc}$  に対し,  $\Delta Y(t_k) = 0$ .

以上のようにして, 解析対象領域における平均観測降雨系列  $r_i (i = 1, 2, \dots, N)$  は, 上述の手順を経て得られる降雨系列  $r(n \cdot \Delta t)_j$  のうち,  $n = i$  となる  $r(n \cdot \Delta t)_j$  を集計することによって, 本流出モデルに入力すべき遅延降雨系列  $r_n(1 \cdot \Delta t)$  に変換される.

ここに,  $l = 1, 2, \dots, N + n_s + n_k - 1$ .

## あとがき

本報告では, 流域内の斜面長分布特性, 雨水伝播特性及び流域内の降雨分布特性を考慮しつつ, 貯留型流出モデルに分類される流出モデルの適用性を向上させることを意図して若干の検討結果を述べた. 本手法の導入によ

り, 雨水流出過程における「遅れ時間」に降雨強度及び流域内の降雨分布特性を反映することが可能となり, 従来の貯留型流出モデルで流域固有の一定の遅れ時間  $T_l$  を導入することにより, 観測ハイドログラフの再現性ないし流出モデルの適用性の向上を図るという手法が一層改良できるものと考えている. すなわち, 貯留型流出モデルの適用に際し, 同一流域においても遅れ時間が出水規模により変化することにも対応できる解析手法として期待している.

## 引用文献

- 1) 長短期流出両用モデルの開発改良研究. 角屋 睦・永井明博, 農業土木学会論文集, 136: 31-38, 1988.
- 2) 流域の部分的開発及び造成畑地の特性を考慮した集中定数型流出モデル. 福島 晟・武田育郎・森 也寸志, 島根大学生物資源科学部研究報告, 4: 65-74, 1998.
- 3) レーダ雨量計を活用した洪水予測システム技術の現状について. 深見和彦, 土木技術資料, 42-7, 12-13, 2000.
- 4) 流域内の降雨分布特性を組込んだ分布型流出モデルとその適用例. 福島 晟・武田育郎・森 也寸志, 島根大学生物資源科学部研究報告, 7: 81-88, 2002.