

流域内の降雨分布特性を組込んだ洪水流出解析法

福島 辰・武田育郎・森 也寸志

A New Technique of Flood Runoff Analysis considering the Characteristics of Rainfall Distribution in a Watershed

Akira FUKUSHIMA, Ikuo TAKEDA and Yasushi MORI

Abstract A method of flood runoff analysis is proposed for routing spatially distributed excess rainfall over a watershed to produce runoff at its outlet. The outline is as follows:

Two runoff models are constructed as distributed types. The first one is a modified model from the Long- and Short- Terms Runoff Model (LST-II model), which is developed by Kadoya and Nagai (1988) for analyzing both flood and long term runoff successively. The other is developed for the Kinematic Wave Storage Model (KiWS model), which is combined kinematic wave runoff model with the LST-II model.

Both models are applicable to analyze a runoff phenomena considering the spatially distributed precipitation observed by radar rainfall measurement system. In order to utilize the radar mesh data in runoff analysis, the routine phase of rainwater flow on hillslope is expressed by the series of the LST-II model or the KiWS one. The slope system of the runoff model is divided to any zones according to the slope length. At each zone of the slope system, the rainfall series at the unit or multiple mesh area by radar measurement are supplied as input data to the runoff model. In the series of the LST-II model, input rainfall is stored to upper part of first tank and distributed automatically each runoff components. In the series of the KiWS model, effective rainfall at each zone of the slope system is automatically calculated by utilizing the structure of the LST-II model. And stream flow in a stream network is expressed by the kinematic wave model. Finally, we illustrate the use of this method for a storm occurred on the 24th of September, 1999 over the Hii River basin.

Key word: Runoff model; runoff analysis; flood runoff

ま え が き

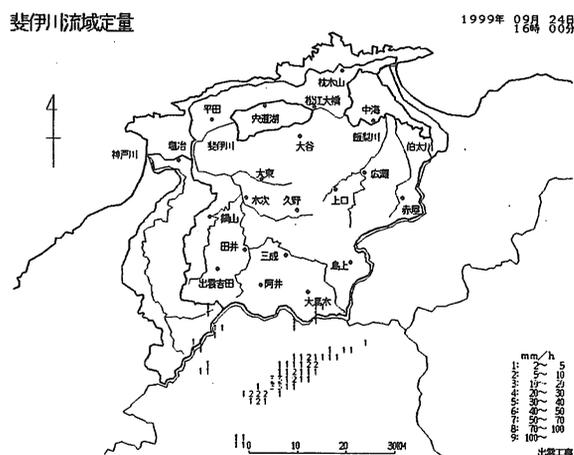
流域内を台風が通過時、あるいは集中豪雨時において、顕著な降雨域の移動、成長、減衰の様子はレーダ雨量計情報を活用した水文観測システムにより、定量的な把握・解析が可能となってきた。これに伴って、従来の洪水流出解析法を基礎にしつつ、レーダ雨量計による降雨情報を活用した中小河川流域、あるいは河川上流域での洪水予測手法に関して新たな視点での検討が期待されている。

すなわち、レーダ雨量計により半径 120km の広範囲にわたる定量的な降雨情報が 5 分ごとに得られることから、流域を 1~5km 程度のメッシュに分割して、各メッシュに対応したレーダメッシュ雨量値を分布型流出モデルへの入力降雨として利用することが可能となり、レーダによる観測降雨情報を活用した洪水予測システムの構築が注目されている。本報告は、こうした背景を意図して、レーダ雨量計で観測される流域内の降雨の時空間的分布特性を分布型流出モデルへの入力降雨に反映させる流出解析法について検討したものである。もっとも、レーダ

雨量計によるレーダメッシュ時間雨量値は、メッシュ直下の単独の地上転倒枿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¹⁾。したがって、現時点では、レーダ雨量計による面積雨量評価精度も洪水流出予測精度に関係することになるが、ここでは、レーダ雨量計データを分布型流出モデルへの入力降雨情報として洪水流出解析に反映させることを目標として着手した検討の一部を報告する。すなわち、流域内の降雨分布特性を反映させ得る貯留分布型及び定数分布型の2種の流出モデルによる洪水流出解析法を提示するとともに、レーダによる観測降雨情報をこれら2種の流出モデルへの入力降雨とした流出計算に基づく若干の検討事例について述べる。なお、レーダ雨量計データを分布型流出モデルによる流出解析に活用することを意図して新たに提示する2種の流出モデルは、一つは角屋・永井により開発提案された長短期流出両用モデル(LST-IIモデル)²⁾を活用した貯留分布型流出モデルであり、他の一つは筆者らの提案しているKiWSモデル³⁾の拡張的利用を図った定数分布型流出モデルである。

1. レーダ雨量情報の画像表示例

レーダ雨量計データを分布型流出モデルへの入力降雨情報として洪水流出解析に反映させる手法を検討するにあたり、まず実流域で観測されたレーダ雨量データを入力し、実際にどのような時空間的降雨分布特性を示しているかの一事例を踏まえて、後述の分布型流出モデルの開発を行った。



40~50, 50~70, 70~100, 100 (mm/h)以上の9階級の降雨強度に区分し、対応する階級1~9で表示してある。なお、図3~図5は、それぞれ9月24日11時、11時30分、12時と30分毎に出力されたレーダ雨量データの画像である。

図4に示す11時30分の時間帯における降雨域が本流域への最大雨量をもたらす状況となり、30分後の12時には、図5に示すように、雨域の中心は島根半島へ移動し、本流域内には強雨域が観測されていない。

斐伊川水系大津地点における洪水流出量を、集中型流出モデルによって算定する場合、入力降雨の単位時間は1時間と設定すれば十分であることを既往の流出解析によって確かめているが、ここでは、流域斜面域における降雨の空間的分布特性も考慮した分布型流出モデルによ

る解析を前提としているため、降雨域のより詳細な情報を反映した30分毎のレーダ雨量データを後述の流出解析における入力降雨として供することとする。

2. 分布型流域モデルの設定

分布型流出モデルとして代表的な雨水流法の適用に際して、解析対象流域をいくつかのブロックに分割し、流域モデルが作成される。その際、河道合流点、地形や地目の急変する点を境にして流域のブロック分割が行われ、特異な地目がない丘陵山地のブロック数は数個、大流域でも20個を越えない程度でよいとされている⁴⁾。一方、レーダ雨量計による降雨情報は、最近では、1kmメッシュレーダ雨量データの利用が可能となっているなど、空間的に細かい分解能でかつ広範囲にわたって提供されている。流域下流端(対象地点)での流出流量を問題とする場合、地上に達した降雨が流域内部での流下過程で受ける流れの変換、平均化作用の影響との関連で降雨の時空間的分布の偏りが考慮されねばならない。したがって、上述の雨水流法では、流出の生起場ないし河道網の形態的特性に主眼をおいて流域のブロック分割が行われていることから、今一度、モデル化された雨水流出場の空間的スケールとレーダメッシュ雨量値の集合から得られる降雨の時空間的分布のスケールとの関連を検討する余地があると思われる。

そこで、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する。

まず、レーダによる観測降雨情報の提供の際に設定される1.5km×1.5kmメッシュ、2.5km×2.5kmメッシュ、

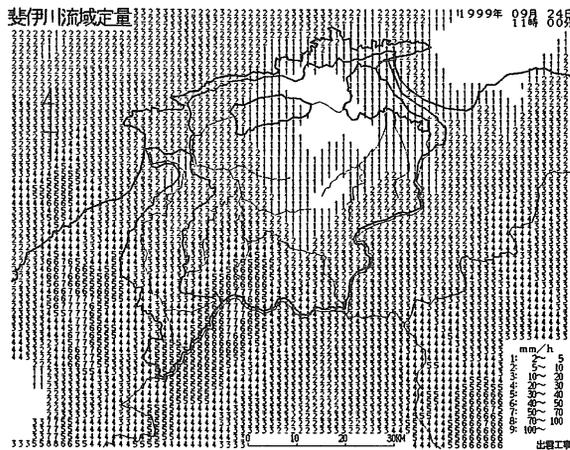


図3 斐伊川水系のレーダ雨量画像
(1999年9月24日11時)
(建設省中国地方建設局の提供)

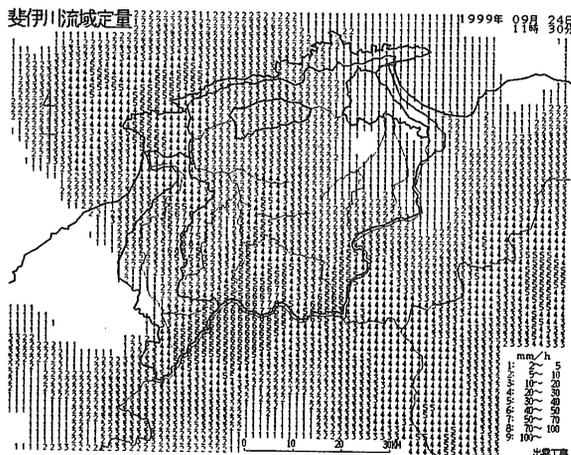


図4 斐伊川水系のレーダ雨量画像
(1999年9月24日11時30分)
(建設省中国地方建設局の提供)

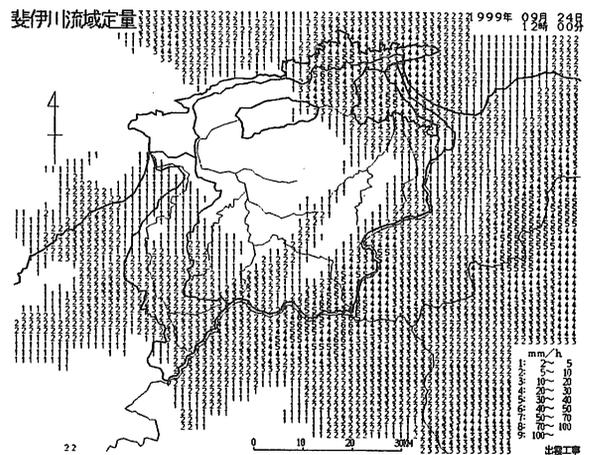


図5 斐伊川水系のレーダ雨量画像
(1999年9月24日12時)
(建設省中国地方建設局の提供)

あるいは5km×5kmメッシュのいずれかで解析対象流域を分割し、1メッシュ分で囲まれた領域を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疑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4ケースの評価法を適用し、入力降雨の空間スケールと流出生起場スケールとの関連を議論するに際しての基礎資料を得ることとする。

ケース1：河道部を1メッシュ毎に分割し、河道部に付随する斜面域は1個あるいは複数個のセルの連鎖で構成される分布型流域モデルを設定する。

ケース2：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、ある次数の集水域を単位流域とする流域分割によって構成される分布型流域モデルを設定する。

ケース3：上述ケース2で設定された分布型流域モデルの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し、ケース2の分布型流域モデルの斜面域をより細分した流域モデルを設定する。

ケース4：上述ケース3で設定された分布型流域モデルにおいて、各ブロックを河道長に応じてさらに上流、

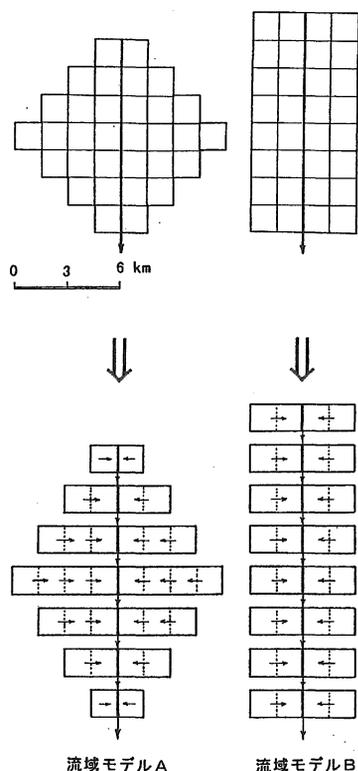


図6 分布型流域モデルの設定 (ケース1)

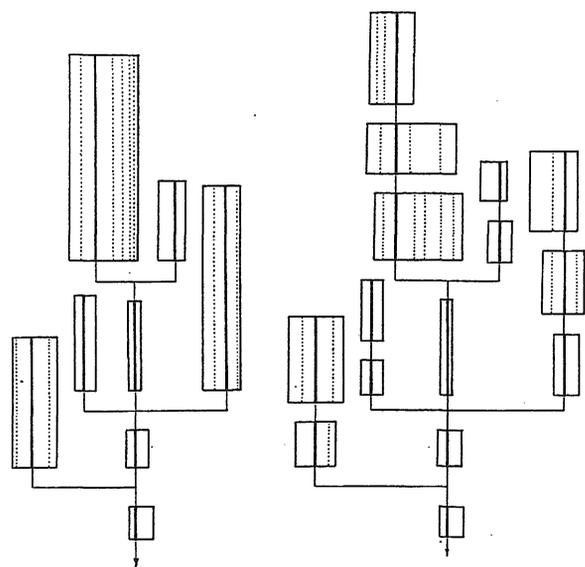
中流、下流部の3分割、あるいは上流、下流部の2分割して構成される分布型流域モデルを設定する。

図6は、上述のケース1により設定した集水域の形状が異なる2つの流域モデルの例である。

図-7(a)は、斐伊川流域大津地点(集水面積=911.4 km²)を集水域としたときの流域モデルである。本流域モデルは、レーダ雨量データ処理システムの端末ディスプレイに表示される斐伊川流域の河道網において1次河道合流点を境にブロック分割して作成した流域モデル(Type 1)、さらにこのType 1の流域モデルの各ブロック斜面域を河道までの距離に応じていくつかの領域に区分して構成した流域モデル(Type 2)である。

ここで、Type 1の流域モデルは、上述のケース2の手法により、またType 2の流域モデルはケース3の手法により設定された分布型流域モデルに相当する。

後述の分布型流出モデルによる流出計算において、Type 1の流域モデルでは、各ブロック毎に、またType 2の流域モデルでは各ブロックでさらに細分された斜面区分毎に、その領域内のレーダメッシュ雨量の平均値が入力降雨として流出計算単位時間毎に与えられるものとする。しかし、斜面域を細分化したType 2の流域モデルにおいても、河道長が長いブロックでは、河道沿いの時空間的降雨分布特性が計算流出流量に十分反映されないことが予想される。そこで、河道長が長いブロックに対しては、河道次数等を基準にしながら河道を上流部、中流部、下流部に3分割ないし上流部、下流部に2分割し、図-7(b)に示すようなType 3の流域モデル



(a) Type 1 (Type 2) (b) Type 3

図7 斐伊川流域(大津地点)の流域モデル

を設定する。この Type 3 の流域モデルでは、Type 2 の流域モデルに比較し、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。

3. 貯留分布型流出モデル

図8は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²⁾を基礎にした貯留型流出モデルである³⁾。ここで、レーダ雨量計データが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、図1の流出モデルを拡張した貯留分布型流出モデル構成を試みることにする。

なお、図8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。

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

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

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

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

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)， θ_{su} 、 θ_{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，%)， θ_{fu} 、 θ_{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)， α 、 α' ：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。

さて、図8の流出モデルを拡張した分布貯留型流出モデルとして、図9に示すような流出モデルを設定する。本流出モデルは、図8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9では図8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8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。図6のように、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 $A_{i,j}$ 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9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。

流出高：

$$Q_{1,ij} = a_1 (S_{s,ij} - Z_s)^m \quad (\text{for } S_{s,ij} > Z_s) \quad \dots (5)$$

$$Q_{2,ij} = a_2 (S_{1,ij} - Z_{12}) \quad (\text{for } S_{1,ij} > Z_{12}) \quad \dots (6)$$

$$Q_{3,ij} = a_3 (S_{2,ij} - Z_3) \quad (\text{for } S_{2,ij} > Z_3) \quad \dots (7)$$

$$Q_{4,ij} = a_4 S_{3,ij} \quad \dots (8), \quad Q_{5,ij} = a_5 S_{4,ij} \quad \dots (9)$$

浸透能：

$$f_{s,ij} = b_s (Z_{11} + Z_{12} - S_{1,ij}) \quad (\text{for } S_{s,ij} > Z_s) \quad \dots (10)$$

$$f_{1,ij} = b_1 (Z_2 + Z_3 - S_{2,ij}) \quad (\text{for } S_{1,ij} > Z_{12}) \quad \dots (11)$$

浸透高：

$$g_{1,ij} = b_2 (S_{2,ij} - Z_3) \quad (\text{for } S_{2,ij} > Z_3) \quad \dots (12)$$

$$g_{2,ij} = b_3 S_{3,ij} \quad \dots (13)$$

連続の式：

$$dS_{s,ij}/dt = r_{a,ij} - Q_{1,ij} - f_{s,ij} + Q_{1,ij-1} \times A_{i,j-1}/A_{i,j} \quad \dots (14)$$

$$dS_{1,ij}/dt = f_{s,ij} - Q_{2,ij} - f_{1,ij} + Q_{2,ij-1} \times A_{i,j-1}/A_{i,j} \quad \dots (15)$$

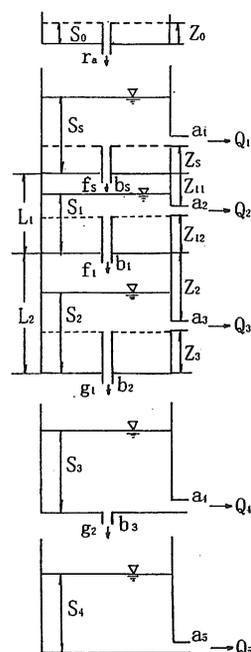


図8 貯留集中型流出モデル (LST-IIモデルの応用モデル)

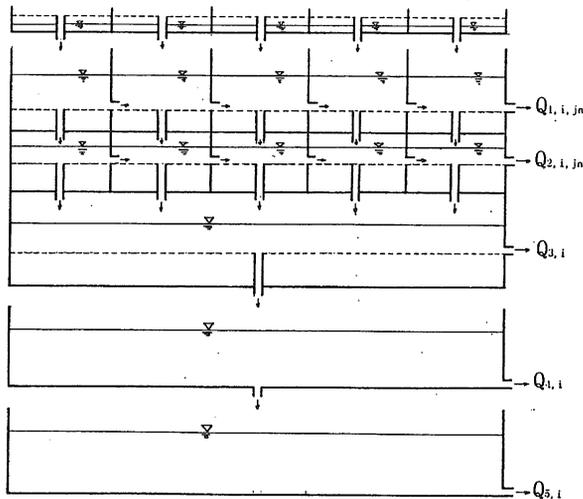


図9 貯留分布型流出モデル
(第*i*番目ブロック、 $j_n=5$)

$$dS_{2i}/dt = \sum \alpha_i f_{1,i,j} - Q_{3i} - g_{1i} \quad \dots (16)$$

$$dS_{3i}/dt = g_{1i} - Q_{4i} - g_{2i} \quad \dots (17)$$

$$dS_{4i}/dt = g_{2i} - Q_{5i} \quad \dots (18)$$

ここに、 $Q_{1,i,j} \sim Q_{5,i}$: 流出高(mm/h), $Q_{1,i,j}$ は表面流出, $Q_{2,i,j}$ は早い中間流出, $Q_{3,i}$ は遅い中間流出, $Q_{4,i}$ と $Q_{5,i}$ は地下水流出を想定する。 $S_{2i,j} \sim S_{4,i}$: 貯留量(mm), $a_1 \sim a_5$ 及び $b_5 \sim b_3$: 定数, $Z_5 \sim Z_3$: 流出孔の高さ(mm), $f_{s,i,j}$ 及び $f_{1,i,j}$: 浸入能(mm/h), g_{1i} 及び g_{2i} : 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時、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。

$$Q = \{(Q_{1,i,j_n} + Q_{2,i,j_n}) \times A_{i,j_n} + (Q_{3,i} + Q_{4,i} + Q_{5,i}) \times A_i\} / 3.6 \quad \dots (19)$$

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。

$$q = Q/L_i \quad \dots (20)$$

ここに、 L_i : 第*i*ブロックの河道長(m)

4. 定数分布型流出モデル

図10は定数集中型KiWSモデル(Kinematic Wave Storage Model)で、本流出モデルは雨水流モデルと角

屋・永井の提案による長短期流出両用モデル(LST-IIモデル)を統合したモデルである⁵⁾。本流出モデル定数 a_1, a_2 は、それぞれ表面流出モデルの斜面流定数 k ($m^{-1/5} \cdot s^{3/5}$)、中間流出モデルの定数 $k_1 \cdot s / \lambda$ (cm/s) に対応している。この定数集中型KiWSモデルは、流域斜面長 B の斜面域において表面流出及び早い中間流出で形成される斜面流出量については雨水流モデルを適用して算定し、遅い中間流出、地下水流出は、LST-IIモデルの第1段タンク下層部、第2~3段タンクをそのまま利用して算定した後に、各流出高の総和に流域面積を乗じて、流域下流端における単位時間毎の計算流出量系列を求める方式の流出モデルであり、河道流計算は組込まれていない。

そこで、上述2.で示したType 2,3の各流域モデルのように各ブロックの斜面域が複数の区分領域で連結され、河道配列構造を反映した流域モデルに対しても、各ブロック斜面域の区分領域毎に時空間的降雨分布特性を取込んだ流出計算が可能となるように分布型流出モデルを構築することを考える。

図11は、各ブロック斜面域の区分領域毎にレーダメッシュ雨量として入手可能な流域内の時空間的降雨分布特性を取込みながら、上述の流域モデルの斜面域及び河道部の雨水流追跡が可能となるように構築された分布型流出モデルの概念図である。すなわち、図10の定数集中型KiWSモデルを連結し、流域斜面域及び河道部の雨水伝播過程を表現しようとしたもので、図11では図10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10に示すモデル構造をそのまま利用している。また、本流出モデルによる流出計算にあたって、定数集中型KiWSモデルによる流出計算プログラムを基礎にしなが、①流域モデルの各ブロック斜面域の区分領域毎に当該領域内に包含されるレーダメッシュ雨量の平均値を入力降雨とし、また斜面域の各区分領域下流端における斜面流出量が隣接する下流側区分領域の上流端流量の境界条件となるように斜面流計算プログラムの修正、②河道流計算プログラムの付加など、新たな計算プログラミングが必要となる。

分布型KiWSモデルによる流出解析において、各ブロック斜面域の任意の1つの区分領域における降雨遮断量、低水流出高、浸透能、浸透高、蒸発散量等は以下の式で算定されるものとする。

降雨遮断量 :

樹木等による降雨遮断量 I_i は、各斜面域の区分領域毎

に、角屋・永井の提案によるLST-IIモデルで採用されている次式の形でを算定する。そして、当該区分領域への入力降雨系列 r_i より降雨遮断量を差し引いた雨量系列 r_a を直下の第1段タンク上層に入力する。

$$r_{a,i} = 3600 \{R_i - (I_i - I_{i-1})\} / \Delta t_i \quad \dots (21)$$

$$I_i = (Z_0 - S_{00}) \{1 - \exp(-R_i/Z_0)\} \quad \dots (22)$$

$$R_i = \sum r_i \cdot \Delta t_i / 3600 \quad \dots (23)$$

ここに、 R_i ：入力降雨の単位時間を Δt_i 秒としたとき、 $i \Delta t_i$ 時刻までの累加雨量(mm)、 I_i ： $i \Delta t_i$ 時刻までの降雨遮断可能量(mm)、 Z_0 ：最大遮断量(mm)、 S_{00} ：初期貯留量(mm)、 r_i ：時刻 $(i-1) \Delta t_i \sim i \Delta t_i$ 間の降雨量(強度) (mm/h)、 $r_{a,i}$ ：時刻 $(i-1) \Delta t_i \sim i \Delta t_i$ 間の降雨遮断効果を受けた後の降雨量(強度) (mm/h)。

低水流出高、浸透能、浸透高：

$$Q_3 = \alpha_{1a_3}(S_2 - Z_3) \quad (\text{for } S_2 \geq Z_3) \quad \dots (24)$$

$$Q_3 = 0 \quad (\text{for } S_2 < Z_3) \quad \dots (25)$$

$$Q_4 = \alpha_{1a_4} S_3 \quad \dots (26)$$

$$Q_5 = \alpha_{1a_5} S_4 \quad \dots (27)$$

$$f = \alpha_{1b_1}(Z_2 + Z_3 - S_2) \quad \dots (28)$$

$$g_1 = \alpha_{1b_2}(S_2 - Z_3) \quad \dots (29)$$

$$g_2 = \alpha_{1b_3} S_3 \quad \dots (30)$$

ここに、 $Q_3 \sim Q_5$ ：流出成分で、 Q_3 は遅い中間流出高(mm/h)、 Q_4 と Q_5 は地下水流出高(mm/h)、 f ：第1段タンク上層部よりの浸透能(mm/h)、 g_1, g_2 ：下段タ

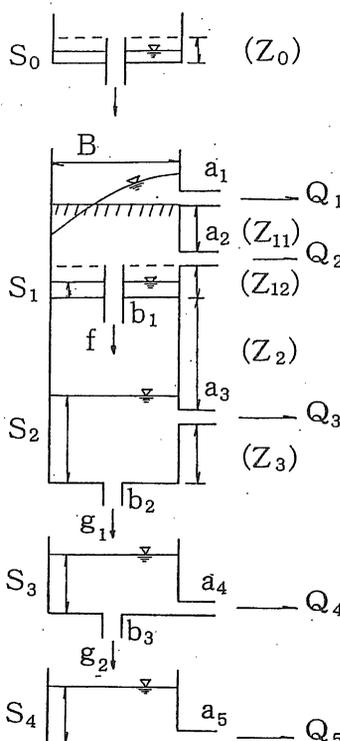


図10 定数集中型 KiWS モデル

ンクへの供給量, (mm/h), $\alpha_1 = \alpha_s/B$, B ：各ブロックの斜面長(m), α_s ：換算係数で計算単位時間を Δt_i 秒としたとき、 $\alpha_s = \Delta t_i \times 10^{-2}$ となるが、各変量に上述のような単位を用いると、 $\alpha_s = 36$ となる。 a_3 ：遅い中間流を規定する定数(cm/s)、 a_4, a_5 ：地下水流を規定する定数 (cm/s)、 $b_1 \sim b_3$ ：鉛直方向の浸透量を規定する定数 (cm/s)、 Z_2, Z_3 ：流出孔の高さ (mm)。

蒸発散量：

蒸発散量 E_t (mm/d) を石原・小葉竹の研究および角屋・永井の長短期流出両用モデルにおける手法を利用し、次式の形式で算定する。

$$E_t = E_1 + E_2 + E_3 \quad \dots (31)$$

$$E_1 = E_0 - E_c, \quad \text{for } S_0 > 0, \quad S_1 > 0$$

$$\text{or } S_2 \geq Z_3 \quad \dots (32)$$

$$= S_2(E_0 - E_c)/Z_3 \quad \text{for } S_0 = S_1 = 0,$$

$$\text{and } 0 \leq S_2 \leq Z_3 \quad \dots (33)$$

$$E_2 = \tau E_c \quad \text{for } S_3 > 0 \quad \dots (34)$$

$$E_3 = (1 - \tau) E_c \quad \text{for } S_4 > 0 \quad \dots (35)$$

ここに、 E_t ：時間 t における蒸発散強度(mm/d)、 E_0 ：最大蒸発散強度 (mm/d)、 E_c ：最終蒸発散強度(mm/d)、 τ ：最終蒸発散量 E_c の第2段タンクへの配分比で、ここでは $\tau = 0.6$ と仮定する。

また、降雨遮断タンクおよび第1段～3段タンクについての連続の式は以下の式で与えられる。

連続の式：

$$dS_0/dt = r - r_a \quad \text{for } S_0 < Z_0 \quad \text{and} \quad r \neq 0$$

$$= 0, \quad \text{for } S_0 = Z_0 \quad \text{and} \quad r \neq 0$$

$$= -E_t', \quad \text{for } 0 < S_0 \leq Z_0 \quad \text{and} \quad r = 0$$

$$\dots (36)$$

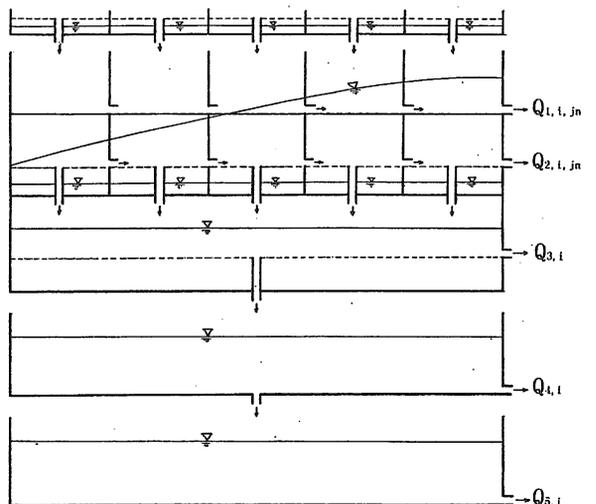


図11 定数分布型 KiWS モデル (第 i 番目ブロック、 $j_n = 5$)

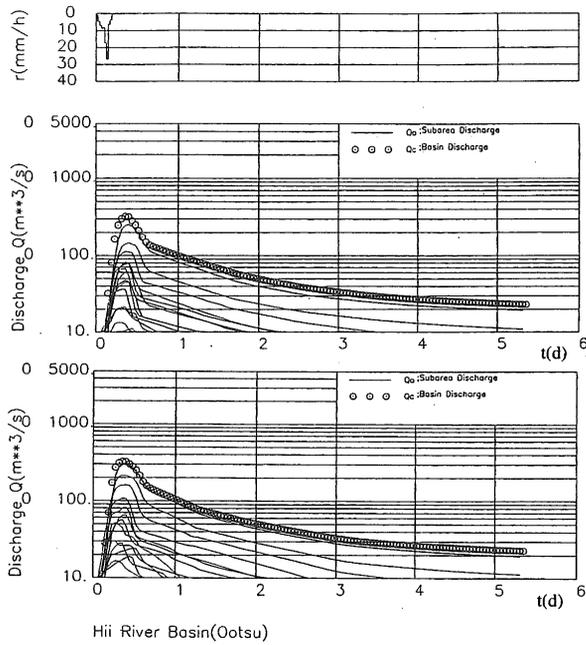
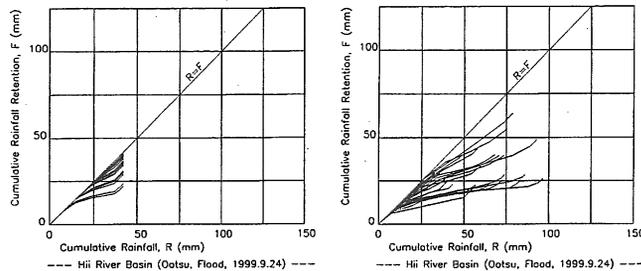
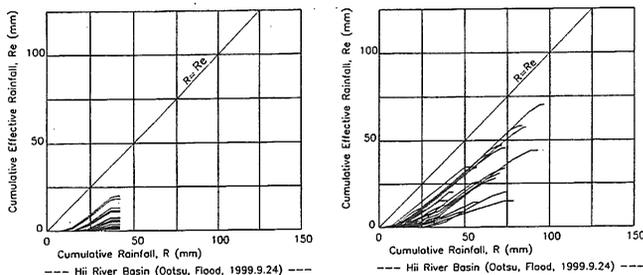


図12 定数分布型 KiWS モデルの適用例 (斐伊川流域, 大津地点)



(a)一様降雨とした場合 (b)降雨分布を考慮した場合

図13 雨水保留量曲線



(a)一様降雨とした場合 (b)降雨分布を考慮した場合

図14 累加雨量～累加有効雨量曲線

$$\begin{aligned}
 dS_1/dt &= r_a, \quad \text{for } 0 \leq S_1 < Z_{12} \\
 &\quad \text{and } r \neq 0 \\
 &= 0, \quad \text{for } S_1 = Z_{12} \text{ and } r \neq 0 \\
 &= -E_1', \quad \text{for } S_0 = 0, \quad 0 \leq S_1 < Z_{12} \text{ and } \\
 &\quad r = 0 \quad \dots (37)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 dS_2/dt &= f_g - Q_3 - g_1 - E_1', \quad \text{for } S_2 \geq Z_3 \\
 &= f_g - g_1 - E_1', \quad \text{for } S_2 < Z_3 \quad \dots (38)
 \end{aligned}$$

$$dS_3/dt = g_1 - Q_4 - g_2 - E_2' \quad \dots (39)$$

$$dS_4/dt = g_2 - Q_5 - E_3' \quad \dots (40)$$

ここに、 S_0 : 降雨遮断タンクの貯留量(mm), t : 時間(h), r : 各ブロックへの入力降雨強度(mm/h), r_a : 降雨遮断効果を受けた後の降雨量(mm/h), $S_1 \sim S_4$: 第1段タンク上層～第3段タンクの貯留量(mm), f_g : 第1段タンク上層よりの補給量(mm/h), $E_1' \sim E_3'$: 蒸発散に伴う各段タンク貯留量の減少強度(mm/h), Z_{12}, Z_3 : 流出孔の高さ(mm)である。

上述の連続式中の $E_1' \sim E_3'$ はそれぞれ $E_1 \sim E_3$ の値を (mm/h) に換算したものである。

上述の低水流出高 $Q_3 \sim Q_5$ に加えて、表面流出及び早い中間流出で形成される斜面流出高 Q_1, Q_2 は雨水流モデルを介して算定する。なお、降雨遮断効果を受けた後の降雨量 r_a は、さらに地表面凹地貯留量 S_1 , 第1タンク上層よりの補給量 f_g を加味して、表面流出及び早い中間流出で形成される斜面流への有効降雨 r_e に変換しておく。

以上のように、分布型流域モデルの各ブロック左右岸からの河道単位長流入量は、直接流出成分のみならず、低水流出成分も包含した流出成分で形成されることとなる。なお、河道流追跡は、雨水流モデルの河道流に関する数値解析によって行う。

5. 適用例

1999年台風18号が斐伊川流域を通過時に得られたレーダメッシュ雨量値を上述の分布型流出モデルへの入力降雨として、流出計算した事例を図12に示す。同図は流域モデル Type 3 に対しての計算例で、中段の計算流出量ハイドログラフは流域一様な降雨を与えた場合 (Case 1) であり、下段の計算流出量ハイドログラフは上述の手法で流域内の降雨分布特性を取込んだ計算例 (Case 2) である。いずれの図においても、流域モデルの各ブロック下流端の流出量ハイドログラフが実線で併示してある。これらの計算結果から、計算単位時間毎の流域平均降雨量を流出モデルへの入力降雨とする従来の手法と上述の

ように流域内の時空間的降雨分布特性を取込んだ手法との比較検討が可能となったと言える。また図 13, 14 は、それぞれ本流出解析事例(Case 1, 2)で得られた各ブロック毎の雨水保留量曲線及び累加雨量～累加有効雨量曲線の例である。流域内の降雨分布特性を反映して、各ブロックの有効降雨系列に顕著な差異が認められる。

あ と が き

本報告では、レーダ雨量計による降雨情報を分布型流出モデルへの入力降雨情報として活用し、かつ流域内の時空間的降雨分布特性が洪水流出波形に及ぼす影響を検討し得る分布型流出モデルとして、長短期流出両用モデルを活用した貯留分布型流出モデル及び KiWS モデルを応用した定数分布型流出モデルの 2 種の流出モデルを提示した。そして、斐伊川流域におけるレーダ雨量情報に基づいた若干の適用例を示したが、ここで提示した流出解析法の実用性、あるいは流出予測への応用可能性については、今後なお各種条件のもとでの流出シミュレーション及び実流域での流出モデルの検証が必要である。

なお、本研究報告は、(財)河川情報センターの平成 11 年度河川情報センター研究助成による研究成果の一

部であり、また建設省中国地方建設局及び建設省出雲工事事務所からレーダ雨量情報の提供いただいたことを付記し、謝意を表す。

引 用 文 献

- 1) 深見和彦：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，土木技術資料，42-7，pp.12-13 (2000)
- 2) 角屋 睦・永井明博：長短期流出両用モデルの開発改良研究，農業土木学会論文集，136，pp. 31-38 (1988)
- 3) 福島 晟・武田育郎・森 也寸志：水文環境の変化に伴う流出形態の変化予測のための流出モデルの開発，島根大学農学部研究報告，29，pp.23-29 (1995)
- 4) 角屋 睦：流出解析手法(その 6)，農業土木学会誌，48(6)，pp.37-43 (1980)
- 5) 福島 晟・武田育郎・森 也寸志：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，島根大学生物資源科学部研究報告，4，pp.65-74 (1999)