

分布型流域モデルを組み込んだ流出解析法の検討

福 島 晟*

A Study on Runoff Analysis included Distributed Basin Model Akira FUKUSHIMA

Abstract A runoff analysis is developed as a clue for estimating problems of the effective rainfall in the multipule land-use basin which is partly developed by field reclamation at improved slope. The outline is as follows.

(1) The runoff model, which is named KiWS Model II (Kinematic Wave Storage Model II), is combined kinematic wave runoff model with LST-II Model (the Long and Short Terms Runoff Model) proposed by Kadoya and Nagai. Namely, the upper zone of the model is composed by kinematic wave model and the lower zone of one is the same with the LST-II model.

(2) The effective rainfall concerned in the surface runoff and/or prompt subsurface runoff is automatically computed in KiWS Model II.

(3) The routine phases of rainwater flow on hillslope and stream flow in stream network are expressed by the kinematic wave model, in which the effective rainfall series are given as input condition corresponding to land use of each basin block.

(4) By a runoff simulation considering the effects of basin development, it is shown that the KiWS Model II is expected to apply as a practical model to runoff analysis for multiple land-use basin.

I. ま え が き

自然丘陵山地流域が改良山成畑工による造成農地あるいはゴルフ場などに開発され、いわゆる土地利用が部分的あるいは全面的に改変される場合に、出水時のピーク流量、ピーク生起時刻、流出波形等の水文応答特性がどのように変化するかについては、試験流域における水文観測とその現象分析により、次第にその実態が明らかにされつつある。しかし、こうした土地利用変化を流域表層条件の改変と工学的に割切っても、実用に供しうる流出解析法については、まだ検討の余地が残されているように思う。ここでは、上述のような土地利用変化に対処しうる流出モデルとして、KiWSモデル (Kinematic Wave Storage model) を提唱するとともに、その適用可能性を流出シミュレーションにより検討してみる。

すなわち、本報では、1) 自然丘陵山地流域の河道配列構造に基づく分布型流域モデルの構成法、次いで、2) 角屋・永井の長短期流出両用モデル¹⁾では、直接流出成分

への有効降雨が自動的に算定できるという特長を活用して、これを雨水流モデルの斜面域への有効降雨とする斜面流計算、ならびに従来の雨水流モデルにおける河道流計算を併用するKiWSモデルを新しく提案する。なお、長短期流出両用モデルの第1段タンク下層、第2、3段タンクの構造を利用して、斜面域からの低水流出量を算定し、河道流計算には直接流出成分のみならず、この低水流出成分をも取込む手法を考えることにする。

II. 河道網の設定法と分布型流域モデル構成

まず、自然丘陵山地流域を対象として、分布型流出モデルの適用に際して設置される流域モデルを河道配列構造に基づいて作成することについて言及する。

国土地理院の1/2.5万あるいは1/5万地形図上に記載の河道の最上流端は一定のルールに従って採択されたものであるから、豪雨時に水みちとなる河道網を忠実に再現しているとはいえない。そこで、前報^{2,3)}で地形図に記載された河道以外に、洪水時の水源部細流を形成する流路部分を等高線の屈曲部の幅 w 、奥行 l の比を利用して計測しうる手法を提案した。すなわち、図-1に示すよう

*農村工学講座

に、 $w/l=1$ となる角度 θ ($\approx 53^\circ$)をもつ線分をトレーシングペーパーに描き、その頂点を等高線の屈曲部上端にあわせ、角度 θ 内に部分的にも $w/l \leq 1$ を満足するような当該の等高線の凹部があれば、その等高線屈曲部の上端までを河道とみなして河道網を設定する。

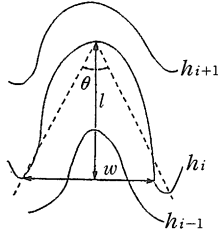


図-1 谷幅 w と谷わん入長 l の計測方式

なお、いくつかの流域の源流部調査を行った著者の経験では、山地流域では1/2.5万の地形図上の等高線の幅奥行比 $w/l=1$ 付近まで水路が存在し、これらが出水時に河道としての役割を果たしているとしてよいと判断している。すなわち、上述のように等高線の幅奥行比 $w/l=1$ とした地形図上で設定される河道網は、実流域の細流網にほぼ照合することになる。

しかし、このような河道網の1次集水域をそのまま単位流域とした流域分割による分布型流域モデル構成は、小流域を対象とした場合でも流域分割数が多くなり、実用上問題が多い。したがって、分布型流域モデルの設定には、流域場の地形形状の特性、流域の部分開発の規模等を考慮した流域場の実用的なモデル化が必要となる。

そこで、上述の地形図上で設定された河道網をまず、 N_1 方式²⁾で次数化する。次いで、1次河道の集水域およびその残流域を単位流域として流域を分割し、それぞれのブロックを長方形ブロックに置換したものを1次流域モデルとする。そして、流域規模に応じた流出現象の時間的・空間的特性を考慮しつつ、実用的観点から流域モデルの単位流域の基準次数を逐次上げて集中化することを考える。すなわち、流域モデルの単位流域の基準次数をモデル集中化の指標とする。また、 u 次集水域を単位流域とする流域モデルを u_* 次流域モデルと呼称することにする。なお、 u_* 次流域モデルは、ブロックの上流側から河道が流入しない外側ブロックと、ブロックの上流側に他のブロックが連なり上流側から河道が流入する内側ブロックとから構成されることになるが、各ブロックの河道長は以下のようにして評価する。

すなわち、外側ブロックでは u 次河道長 L_u と主流方向の $(u-1)$ 次河道長 L_{u-1} の和で、内側ブロックではそのブロックの主河道長を当該ブロックの河道長とす

る。河道長をこの方式で算定することにより、外側ブロックと内側ブロックの平均斜面長もほぼ均衡した値が得られることを確かめている⁴⁾

また、各ブロックの斜面勾配の計測には、加重平均による谷線法⁴⁾を適用する。

III. 流出モデルと流出解析法

1. 流出モデル

図-2は、上述の分布型流域モデルの各ブロック斜面域における雨水の流れを表現しようとするモデル図である。本モデルは、雨水流モデルと長短期流出両用モデルを併合した流出モデルを意図している。すなわち、長短期流出両用モデルにおいて、樹木等による降雨遮断効果、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て、降雨遮断量、遅い中間流出量、地下水流出量を算定する一方、表面流、早い中間流で形成される斜面流および河道流には雨水流モデルを適用しようとする流出モデルであることから、著者は本流出モデルをKiWSモデル(Kinematic Wave Storage Modelの略称)と呼ぶことにする。

なお、著者は、前報⁵⁾において、KWSTモデルとして同種の流出モデルを検討しているが、ここで改めてKiWSモデルと呼称することにする。

第1段タンク下層部への雨水浸透成分は、遅い中間流および地下水流を構成する低水流出成分に変換される。前報⁵⁾では、図-2のタンクは底幅が単位長(=1m)、奥行が分布型流域モデルの平均斜面長 B (m)とする単一のタンクとし、この単一のタンクからの低水流出高を算定するとともに、表面流、早い中間流で構成される直接流出高を分布型流出モデルである雨水流モデルで追跡

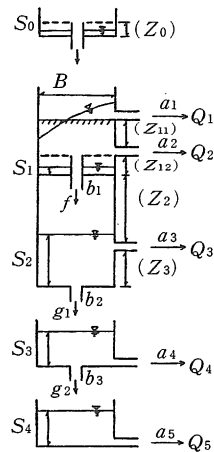


図-2 KiWSモデルII

し、流域最下流端部における直接流出高を算定した後、この直接流出高と前述の低水流出高との和を、計算単位時間毎の流域最下流端流出量に換算する手法としていた。

しかし、流域内の土地利用形態の分布特性を考慮した流出解析を意図する場合、上述の手法では不合理な点が指摘できる。すなわち、分布型流域モデルを構成し、各ブロックごとに土地利用形態に応じた表面流、早い中間流を規定する流出モデル定数を与えることが可能であっても、第1段タンク下層部への雨水浸透高が計算単位時間毎に各ブロック様な値で算定されるため、各ブロックとも同一波形の有効降雨系列とする条件のもとに流出解析を行うことになる。したがって、前報⁵⁾で示した手法は、流域場の地形形状に関する分布特性を流域モデルに反映させることは可能であっても、表面流、早い中間流を規定する流出モデル定数が流域一様と仮定しうの場合、あるいは流域一様と仮定した場合の解析結果を与えることになる。

実流域での雨水の流れに忠実に、モデル化するには流出現象を支配する他の諸要素も考慮しなければならないが、ここではとりあえず、以下のようにして、前報⁵⁾の手法に改良を加え、分布型流域モデルにおける各ブロックの土地利用形態に応じた斜面流への有効降雨系列が算定できるようにする。

なお、以下では本報で示すKiWSモデルをKiWSモデルIIとし、前報のをKiWSモデルIと呼称することにする。

さて、分布型流域モデルの各ブロックの斜面域においては、図-2に示すKiWSモデルIIにより、降雨遮断量、低水流出高、浸透能、浸透高、蒸発散量が以下の式で算定されるものとする。

降雨遮断量：

角屋・永井法で採用されている次式で樹木等による降雨遮断量 I_i を算定し、分布型流域モデルの各ブロックへの入力降雨系列 r_i より降雨遮断量を差し引いた雨量系列 r_a を第1段タンク上層に入力する¹⁾

$$r_a, i = 3600 \{ R_i - (I_i - I_{i-1}) / \Delta t_r \} \dots \dots \dots (1)$$

$$I_i = (z_0 - S_{00}) \{ 1 - \exp(-R_i / z_0) \} \dots \dots \dots (2)$$

$$R_i = \sum r_i \cdot \Delta t_r / 3600 \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 R_i :入力降雨の単位時間を Δt_r 秒としたとき、 $i \Delta t_r$ 時刻までの累加雨量(mm)、 I_i : $i \Delta t_r$ 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 $(i-1) \Delta t_r \sim i \Delta t_r$ 間の降雨量(強度)(mm/h)、 r_a, i :時刻 $(i-1) \Delta t_r \sim i \Delta t_r$ 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：

$$Q_3 = \alpha_1 a_3 (S_2 - z_3), \text{ for } S_2 \geq z_3 \dots \dots \dots (4)$$

$$Q_3 = 0, \text{ for } S_2 < z_3$$

$$Q_4 = \alpha_1 a_4 S_3 \dots \dots \dots (5)$$

$$Q_5 = \alpha_1 a_5 S_4 \dots \dots \dots (6)$$

$$f = \alpha_1 b_1 (z_2 + z_3 - S_2) \dots \dots \dots (7)$$

$$g_1 = \alpha_1 b_2 S_2 \dots \dots \dots (8)$$

$$g_2 = \alpha_1 b_3 S_3 \dots \dots \dots (9)$$

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_s 秒としたとき、 $\alpha_s = \Delta t_s \times 10^{-2}$ 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⁶⁾および角屋・永井の長短期流出両用モデルにおける手法¹⁾を利用し、次式の形式で算定することにする。

$$E_t = E_1 + E_2 + E_3 \dots \dots \dots (10)$$

$$E_1 = E_0 - E_c$$

$$\text{for } S_0 > 0, S_1 > 0,$$

$$\text{or } S_2 \geq z_3 \dots \dots \dots (11)$$

$$= \frac{S_2}{z_3} (E_0 - E_c),$$

$$\text{for } S_0 = S_1 = 0, \text{ and } 0 \leq S_2 \leq z_3$$

$$E_2 = \tau E_c, \text{ for } S_3 > 0 \dots \dots \dots (12)$$

$$E_3 = (1 - \tau) E_c, \text{ for } S_4 > 0 \dots \dots \dots (13)$$

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：

$$\frac{dS_0}{dt} = r - r_a \text{ for } S_0 < z_0 \text{ and } r \neq 0$$

$$= 0 \text{ for } S_0 = z_0 \text{ and } r \neq 0 \dots \dots \dots (14)$$

$$= -E_1', \text{ for } 0 < S_0 \leq z_0 \text{ and } r = 0$$

$$\frac{dS_1}{dt} = r_a, \text{ for } 0 \leq S_1 < z_{12} \text{ and } r \neq 0$$

$$\frac{dS_1}{dt} = r_a, \text{ for } 0 \leq S_1 < z_{12} \text{ and } r \neq 0$$

$$= 0, \text{ for } S_1 = z_{12} \text{ and } r \neq 0 \dots \dots \dots (15)$$

$$= -E_1', \text{ for } S_0 = 0, 0 < S_1 \leq z_{12} \text{ and } r = 0$$

$$\frac{dS_2}{dt} = f_g - Q_3 - g_1 - E_1', \text{ for } S_2 \geq z_3 \dots\dots(16)$$

$$= f_g - g_1 - E_1' \quad , \text{ for } S_2 < z_3$$

$$\frac{dS_3}{dt} = g_1 - Q_4 - g_2 - E_2' \dots\dots\dots(17)$$

$$\frac{dS_4}{dt} = g_2 - Q_5 - E_3' \dots\dots\dots(18)$$

ここに、 S_0 ：降雨遮断タンクの貯留量 (mm)、 t ：時間 (h)、 r ：流域平均降雨強度 (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 段タンク上層部よりの補給量 (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_2, z_3 ：流出孔の高さ (mm) である。

上述の連続の式中の $E_1' \sim E_3'$ 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。

次いで、表面流および早い中間流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斜面下流端における河道への単位幅当たり横流入量として算定する。なお、各ブロック左右岸斜面域からの河道単位長流入量には、表面流および早い中間流で形成される斜面流出成分のみならず、上述の低水流出高 $Q_3 \sim Q_5$ も河道単位長流入量に換算して加算するものとする。すなわち、河道流は直接流出成分のみならず、低水流出成分も含まれた流れとして、雨水流モデルを適用して追跡することになる。したがって、本流出モデルは、洪水流出期間のみならず、長期流出解析にも拡張した適用が可能といえる。

また、表面流、早い中間流を形成する斜面流への有効降雨は以下のようにして算定する。

まず、上述の降雨遮断効果を受けた後の降雨量 r_a を算定し、次いで (15) 式により、地表面凹地貯留量 S_1 を算定し、 r_a から S_1 を差し引き、残りの降雨量を r_e とする。そして斜面流への有効降雨 r_s は、 $r_s = r_e - f_g$ として算定される。この場合、第 1 段タンク上層部よりの補給量 f_g は、(i) 計算単位時間 Δt_s 内に (7) 式で表現される浸透能 f に見合うだけの降雨が補給され、 $f_g = f$ で与えられる場合、(ii) Δt_s 内に浸透能 f に見合うだけの降雨がなく、 f_g が Δt_s 内の降雨量に規定され、 $f_g = r_e (r_e < \bar{f}, \bar{f}$ は Δt_s 内の平均浸透能) で与えられる場合とがある。

したがって、斜面流への有効降雨系列 r_s は、上述のタンク貯留量 $S_0 \sim S_4$ および流出高 $Q_3 \sim Q_4$ 等の計算過程と平行して、算定されることになる。

なお、図-2 の KiWS モデル II において、 a_1 は雨水流モデルで定義されている斜面の等価粗度 N ないし斜面流定数 k を、 a_2 は Darcy 型中間流を規定する定数で $k_1 \cdot s / \lambda$ ないし k_1 / λ を意味している。また、 z_{11} が中間流発生場の表層厚 D と λ との積 λD に相当している。ここに、

k_1 ：表層土の透水係数、 λ ：表層の有効間隙率、 s ：斜面勾配である。

2. 低水流出高の算定

いま、KiWS モデル II の第 1 段タンク下層部、第 2～3 段タンクよりの流出高 Q_3, Q_4, Q_5 で形成される低水流出高を流出サイクルと対応づけて考えてみることにする。この場合、1 つの流出サイクルにおいて低水流出部は 5 つのステージに区分して考えることができる。すなわち、表-1 に示すように第 1 段タンク下層部の貯留量 S_2 と第 1 段タンク下層部の流出孔の高さ z_3 との相対的關係で定まる遅い中間流出成分の有無、第 1 段タンク上層部よりの補給高 f_g の有無により 1 つの流出サイクルが 5 つのステージに区分できる。

本流出モデルでは、無降雨期間に相当するステージ 1, 2 では $f_g = 0$ となる。また、蒸発散作用に起因する貯留量の減少はステージ 1, 2 においてのみ生ずるものとする。

ステージ 3, 4 では第 1 段タンク上層部からの補給高 f_g として、前述のように 2 つの形式が考えられるので、ステージ 3, 4 をステージ 3-I, II, 4-I, II のようにそれぞれ 2 つに区分する。また、ステージ 5 は貯留量 S_2 の上限値 S_{2u} が継続する期間であり、補給高 f_g は後述の (41) 式により算定される最終浸透能 f_c で与えられる。

結局、1 つの流出サイクルにおいて低水流出部によって形成される流出形態は表-1 に示すように 7 つのパターンに区分して考えることができる。

また、各ステージ間の遷移は図-3 のように 10 ケースとなる。斜面域における流出計算の単位時間を Δt_s としたとき、 Δt_s 内にステージ間の遷移が生ずる可能性があるのは図-3 に示す遷移のうち、遷移①, ⑤, ⑥, ⑧である。

表-1 低水流出高のパターン

低水流出高のパターン	ステージ	貯留量 S_2 (mm)	遅い中間流出高 Q_3 (mm/h)	補給高 f_g (mm/h)	蒸発散量 E_t (mm/d)
1	1	$z_3 \leq S_2 \leq S_{2u}$	$Q_3 \neq 0$	$f_g = 0$	$E_t \neq 0$
2	2	$0 \leq S_2 \leq z_3$	$Q_3 = 0$	$f_g = 0$	$E_t \neq 0$
3	3-I	$0 \leq S_2 \leq z_3$	$Q_3 = 0$	$f_g = f$	$E_t = 0$
4	3-II	$0 \leq S_2 \leq z_3$	$Q_3 = 0$	$f_g = f_0$	$E_t = 0$
5	4-I	$z_3 \leq S_2 \leq S_{2u}$	$Q_3 \neq 0$	$f_g = f$	$E_t = 0$
6	4-II	$z_3 \leq S_2 \leq S_{2u}$	$Q_3 \neq 0$	$f_g = f_0$	$E_t = 0$
7	5	$S_2 = S_{2u}$	$Q_3 \neq 0$	$f_g = f_c$	$E_t = 0$

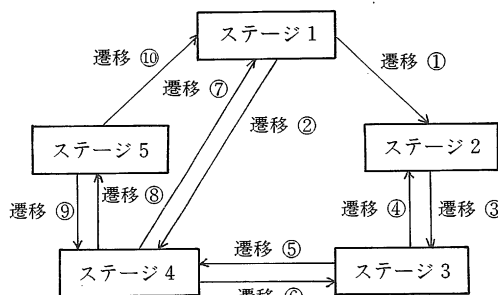


図-3 流出サイクルの区分と各ステージの遷移パターン

KiWS モデルIIの各段タンク貯留量 $S_2 \sim S_4$ および低水流出高 $Q_3 \sim Q_5$ の算定法を以下に示す。

(1) 各段タンク貯留量の算定

計算単位時間内で降雨強度が一定と仮定すると、各段タンク貯留量 $S_2 \sim S_4$ に関する線形常微分方程式が得られるため、計算単位時間毎の $S_2 \sim S_4$ が常微分方程式の解として定式化できる。

すなわち、時刻 t における $S_2(t) \sim S_4(t)$ を既知としたとき、計算単位時間 Δt_s 後の時刻 $t + \Delta t_s$ における貯留量 $S_2(t + \Delta t_s) \sim S_4(t + \Delta t_s)$ は各ステージに応じ、それぞれ以下の式で算定される。ここで、ステージ1、2で生じる蒸発散量は(10)~(13)式により評価されている。なお、貯留量 $S_2 \sim S_4$ の時刻 $t \sim t + \Delta t_s$ 間の平均貯留量の算定式は省略する。

i) ステージ1 ($z_3 \leq S_2 \leq S_{2u}$, $f_g = 0$, $E_t \neq 0$)

$$S_2(t + \Delta t_s) = J_0 \exp(-\lambda_0 \Delta t_s) + \zeta_0 \quad \dots (19)$$

$$S_3(t + \Delta t_s) = J_1 \exp(-\lambda_0 \Delta t_s) + J_2 \exp(-\lambda_2 \Delta t_s) + J_3 \quad \dots (20)$$

$$S_4(t + \Delta t_s) = J_4 \exp(-\lambda_0 \Delta t_s) + J_5 \exp(-\lambda_2 \Delta t_s) + J_6 \exp(-\lambda_3 \Delta t_s) + J_7 \quad \dots (21)$$

ii) ステージ2 ($0 \leq S_2 \leq z_3$, $f_g = 0$, $E_t \neq 0$)

$$S_2(t + \Delta t_s) = S_2(t) \exp(-\lambda_1 \Delta t_s) \quad \dots (22)$$

$$S_3(t + \Delta t_s) = J_8 \exp(-\lambda_1 \Delta t_s) + J_9 \exp(-\lambda_2 \Delta t_s) - \zeta_3 \quad \dots (23)$$

$$S_4(t + \Delta t_s) = J_{10} \exp(-\lambda_1 \Delta t_s) + J_{11} \exp(-\lambda_2 \Delta t_s) + J_{12} \exp(-\lambda_3 \Delta t_s) + J_{13} \quad \dots (24)$$

iii) ステージ3-I ($0 \leq S_2 \leq z_3$, $f_g = f$, $E_t = 0$)

$$S_2(t + \Delta t_s) = J_{14} \exp(-\lambda_4 \Delta t_s) + \zeta_{10} \quad \dots (25)$$

$$S_3(t + \Delta t_s) = J_{15} \exp(-\lambda_4 \Delta t_s) + J_{16} \exp(-\lambda_2 \Delta t_s) + J_{17} \quad \dots (26)$$

$$S_4(t + \Delta t_s) = J_{18} \exp(-\lambda_4 \Delta t_s)$$

$$+ J_{19} \exp(-\lambda_2 \Delta t_s) + J_{20} \exp(-\lambda_3 \Delta t_s) + J_{21} \quad \dots (27)$$

iv) ステージ3-II ($0 \leq S_2 \leq z_3$, $f_g = f_0$, $E_t = 0$)

$$S_2(t + \Delta t_s) = J_{22} \exp(-\lambda_5 \Delta t_s) + J_{23} \quad \dots (28)$$

$$S_3(t + \Delta t_s) = J_{24} \exp(-\lambda_5 \Delta t_s) + J_{25} \exp(-\lambda_2 \Delta t_s) + J_{26} \quad \dots (29)$$

$$S_4(t + \Delta t_s) = J_{27} \exp(-\lambda_5 \Delta t_s) + J_{28} \exp(-\lambda_2 \Delta t_s) + J_{29} \exp(-\lambda_3 \Delta t_s) + J_{30} \quad \dots (30)$$

v) ステージ4-I ($z_3 \leq S_2 \leq S_{2u}$, $f_g = f$, $E_t = 0$)

$$S_2(t + \Delta t_s) = J_{31} \exp(-\lambda_6 \Delta t_s) + S_{2u} \quad \dots (31)$$

$$S_3(t + \Delta t_s) = J_{32} \exp(-\lambda_6 \Delta t_s) + J_{33} \exp(-\lambda_2 \Delta t_s) + J_{34} \quad \dots (32)$$

$$S_4(t + \Delta t_s) = J_{35} \exp(-\lambda_6 \Delta t_s) + J_{36} \exp(-\lambda_2 \Delta t_s) + J_{37} \exp(-\lambda_3 \Delta t_s) + J_{38} \quad \dots (33)$$

vi) ステージ4-II ($z_3 \leq S_2 \leq S_{2u}$, $f_g = f_0$, $E_t = 0$)

$$S_2(t + \Delta t_s) = J_{39} \exp(-\lambda_0 \Delta t_s) + J_{40} \quad \dots (34)$$

$$S_3(t + \Delta t_s) = J_{41} \exp(-\lambda_0 \Delta t_s) + J_{42} \exp(-\lambda_2 \Delta t_s) + J_{43} \quad \dots (35)$$

$$S_4(t + \Delta t_s) = J_{44} \exp(-\lambda_0 \Delta t_s) + J_{45} \exp(-\lambda_2 \Delta t_s) + J_{46} \exp(-\lambda_3 \Delta t_s) + J_{47} \quad \dots (36)$$

vii) ステージ5 ($S_2 = S_{2u}$, $f_g = f_c$, $E_t = 0$)

$$S_2(t + \Delta t_s) = S_{2u} \quad \dots (37)$$

$$S_3(t + \Delta t_s) = J_{48} \exp(-\lambda_2 \Delta t_s) + J_{34} \quad \dots (38)$$

$$S_4(t + \Delta t_s) = J_{49} \exp(-\lambda_2 \Delta t_s) + J_{50} \exp(-\lambda_3 \Delta t_s) + J_{38} \quad \dots (39)$$

ここに、 $\lambda_0 = \alpha_1(a_3 + b_2)$,

$$\lambda_1 = \alpha_1 b_2 + (E_0 - E_c) / z_3,$$

$$\lambda_2 = \alpha_1(a_4 + b_3),$$

$$\lambda_3 = \alpha_1 a_5, \lambda_4 = \alpha_1(b_1 + b_2),$$

$$\lambda_5 = \alpha_1 b_2, \lambda_6 = \alpha_1(a_3 + b_1 + b_2)$$

$$\zeta_0 = (\alpha_1 a_3 z_3 - E_0 + E_c) / \lambda_0,$$

$$\zeta_1 = \alpha_1 b_2 / (\lambda_0 - \lambda_2), \zeta_2 = \alpha_1 b_2 / \lambda_2,$$

$$\zeta_3 = \tau E_c / \lambda_2, \zeta_4 = \alpha_1 b_3 / (\lambda_0 - \lambda_3),$$

$$\zeta_5 = \alpha_1 b_3 / (\lambda_2 - \lambda_3), \zeta_6 = \alpha_1 b_3 / \lambda_3,$$

$$\zeta_7 = (1 - \tau) E_c / \lambda_3,$$

$$\zeta_8 = \alpha_1 b_2 / (\lambda_1 - \lambda_2),$$

$$\zeta_9 = \alpha_1 b_3 / (\lambda_1 - \lambda_3);$$

$$\zeta_{10} = \alpha_1 b_1(z_2 + z_3) / \lambda_4,$$

$$\zeta_{11} = \alpha_1 b_2 / (\lambda_4 - \lambda_2),$$

$$\begin{aligned}
 \zeta_{12} &= \alpha_1 b_3 / (\lambda_4 - \lambda_3), \\
 \zeta_{13} &= \alpha_1 b_2 / (\lambda_5 - \lambda_2), \\
 \zeta_{14} &= \alpha_1 b_3 / (\lambda_5 - \lambda_3), \\
 \zeta_{15} &= \alpha_1 b_2 / (\lambda_6 - \lambda_2), \\
 \zeta_{16} &= \alpha_1 b_3 / (\lambda_6 - \lambda_3), \\
 \zeta_{17} &= \alpha_1 a_3 z_3 \\
 J_0 &= S_2(t) - \zeta_0, J_1 = -\zeta_1 J_0, \\
 J_2 &= S_3(t) - J_1 - J_3, J_3 = \zeta_0 \zeta_2 - \zeta_3, \\
 J_4 &= \zeta_1 \zeta_4 J_0, J_5 = -\zeta_5 J_2, \\
 J_6 &= S_4(t) - J_4 - J_5 - J_7, J_7 = \zeta_6 J_3 - \zeta_7, \\
 J_8 &= -\zeta_8 S_2(t), J_9 = S_3(t) - J_8 + \zeta_3, \\
 J_{10} &= -\zeta_9 J_8, J_{11} = -\zeta_5 J_9, \\
 J_{12} &= S_4(t) - J_{10} - J_{11} - J_{13}, J_{13} = -\zeta_3 \zeta_6 - \zeta_7, \\
 J_{14} &= S_2(t) - \zeta_{10}, J_{15} = -\zeta_{11} J_{14}, \\
 J_{16} &= S_3(t) - J_{15} - J_{17}, J_{17} = \zeta_2 \zeta_{10}, \\
 J_{18} &= -\zeta_{12} J_{15}, J_{19} = -\zeta_5 J_{16}, \\
 J_{20} &= S_4(t) - J_{18} - J_{19} - J_{21}, J_{21} = \zeta_6 J_{17}, \\
 J_{22} &= S_2(t) - J_{23}, J_{23} = f_0 / \lambda_5, J_{24} = -\zeta_{13} J_{22} \\
 J_{25} &= S_3(t) - J_{24} - J_{26}, J_{26} = \zeta_2 J_{23}, \\
 J_{27} &= -\zeta_{14} J_{24}, J_{28} = -\zeta_5 J_{25}, \\
 J_{29} &= S_4(t) - J_{27} - J_{28} - J_{30}, J_{30} = \zeta_6 J_{26}, \\
 J_{31} &= S_2(t) - S_{2u}, J_{32} = -\zeta_{15} J_{31}, \\
 J_{33} &= S_3(t) - J_{32} - J_{34}, J_{34} = \zeta_2 S_{2u}, \\
 J_{35} &= -\zeta_{16} J_{32}, J_{36} = -\zeta_5 J_{33}, \\
 J_{37} &= S_4(t) - J_{35} - J_{36} - J_{38}, J_{38} = \zeta_6 J_{34}, \\
 J_{39} &= S_2(t) - J_{40}, J_{40} = (f_0 + \zeta_{17}) / \lambda_0, \\
 J_{41} &= -\zeta_1 J_{39}, J_{42} = S_3(t) - J_{41} - J_{43}, \\
 J_{43} &= \zeta_2 J_{40}, J_{44} = -\zeta_4 J_{41}, J_{45} = -\zeta_5 J_{42}, \\
 J_{46} &= S_4(t) - J_{44} - J_{45} - J_{47}, J_{47} = \zeta_6 J_{43}, \\
 J_{48} &= S_3(t) - J_{34}, J_{49} = -\zeta_5 J_{48}, \\
 J_{50} &= S_4(t) - J_{49} - J_{38}
 \end{aligned}$$

また、 S_{2u} は貯留量 S_2 の上限値、 f_c は最終浸透能でそれぞれ次式で表される。

$$S_{2u} = \frac{f_u - f_c}{\alpha_1 b_1} = \frac{b_1(z_2 + z_3) + a_3 z_3}{a_3 + b_1 + b_2} \dots \dots (40)$$

$$\left. \begin{aligned}
 \text{ここに、} f_u &= \alpha_1 b_1 (z_2 + z_3), \\
 f_c &= \frac{\alpha_1 \{ b_1 b_2 (z_2 + z_3) + a_3 b_1 z_2 \}}{a_3 + b_1 + b_2} \end{aligned} \right\} \dots \dots (41)$$

したがって、第 1 段タンク下層部より第 2 段タンクへの供給量 g_{1u} の上限値は $g_{1u} = \alpha_1 b_2 S_{2u}$ で与えられる。この g_{1u} を (17) 式に代入し、 $dS_3/dt = 0$ なる S_3 を求めると、貯留量 S_3 の上限値 S_{3u} として次式が得られる。ただし、この場合は蒸発散量を考慮するものとする。

$$S_{3u} = \frac{1}{\alpha_1 (a_4 + b_3)} \left\{ \frac{b_2 (f_u - f_c)}{b_1} - \tau E_c \right\} \dots \dots (42)$$

同様に、貯留量 S_4 の上限値 S_{4u} は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 S_{4u} &= \frac{1}{\alpha_1 a_5} \left\{ \frac{b_3}{a_4 + b_3} \left\{ \frac{b_2 (f_u - f_c)}{b_1} - \tau E_c \right\} \right. \\
 &\quad \left. - (1 - \tau) E_c \right\} \dots \dots \dots (43)
 \end{aligned}$$

(2) 低水流出高の算定

前項 (1) により、時刻 t における貯留量 $S_2(t) \sim S_4(t)$ を既知したとき、計算単位時間 Δt_s 後の貯留量 $S_2(t + \Delta t_s) \sim S_4(t + \Delta t_s)$ の算定が可能になった。そこで、これらの値を (4)~(6) 式に代入することにより、流出サイクルの各ステージに応じた時刻 $t + \Delta t_s$ における低水流出高 $Q_3(t + \Delta t_s) \sim Q_5(t + \Delta t_s)$ が求められることができる。

3. 流出解析の手順

分布型流域モデルの各ブロックにわたって、KiWS モデル II を用いて流出解析する手順は以下のとおりである。

i) まず、各ブロックへの入力降雨の単位時間 Δt_r 毎の降水量から樹木等による降雨遮断量を差し引く。ここで降雨遮断量は (1)~(3) 式により算定する。

ii) 降雨遮断効果を受けた後の降雨量 r_a から地表面凹地貯留量を差し引き、残りの降雨量を r_e とする。すなわち、図-2 に示すように、第 1 段タンク上層部の貯留量 S_1 の上限を z_{12} とし、降雨量 r_a は S_1 が z_{12} に達するまで地表面凹地貯留量の増加量となり、 $S_1 = z_{12}$ となった以降の降雨分は以下の手順により直接流出成分への有効降雨 r_s ないし補給高 f_g として評価される。ただし、各ブロック斜面域での計算単位時間は Δt_s とする。

iii) $r_e = 0$ のときは、 $r_s = f_g = 0$ となり、 S_2 と z_3 の大小関係によりステージ 1 または 2 の流出計算をする。

iv) $r_e \neq 0$ のときは、ステージ 3, 4, 5 のいずれかのステージについて流出計算をする。この場合、直接流出成分への有効降雨 r_s は $r_e > \bar{f}$ のとき $r_s = r_e - \bar{f}$ 、 $r_e \leq \bar{f}$ のとき $r_s = 0$ として算定する。ここで、 \bar{f} は計算単位時間 Δt_s 内の平均浸透能である。 \bar{f} は (7) 式および前述のタンク貯留量 S_2 の算定式を用いて、次式から求める。

$$\bar{f} = \alpha_1 b_1 (z_2 + z_3 - \bar{S}_2) \dots \dots \dots (44)$$

ここで、 \bar{S}_2 は時刻 $t \sim t + \Delta t_s$ 間の平均貯留量である。

v) ステージ 3, 4, 5 において、低水流出に関与する第 1 段タンク下層部への補給高 f_g は $r_e > \bar{f}$ のときは $f_g = f$ 、すなわち、 $r_e > \bar{f}$ のとき、 f_g は Δt 時間内で一定値 \bar{f} とするのではなく、前述の S_2 の時間的変化曲線

式を(10)式に代入して評価される浸透能 f の値を用いることにする。また、 $r_e \leq \bar{f}$ のときは $f_g = f_0 = r_e$ でえられる。

vi) 時刻 t の貯留量 $S_2 \sim S_4$ を既知とし、 Δt_s 時間後の貯留量 $S_2 \sim S_4$ を算定する。

vii) 時刻 $t + \Delta t_s$ における低水流出高 $Q_B = \sum Q_i$ を算定する。

viii) 前述のi)～vii)を流出解析の対象期間まで繰り返す。

ix) 斜面流を表面流および早い中間流の共存する流れとして追跡する雨水流モデルを適用し、図-2の流出高 Q_1, Q_2 の和に相当する斜面下流端における単位幅流量 q_s を算定する。なお、斜面流への有効降雨は、前述のiv)で算定される直接流出成分への有効降雨系列 r_s とする。

x) 上述vii)で算定した低水流出高系列 Q_B を河道単位長流入量系列 q_B に換算した後、 q_B と q_s との和で評価される河道単位長流入量系列 q を算定する。

xi) 河道単位長流入量系列 q および各ブロック上流端からの河道流入量系列 Q_{ci} を取込んだ河道流追跡を雨水流モデルの河道流に関する数値解析によって行う。ただし、河道流追跡単位時間は Δt_c とする。

xii) 分布型流域モデルの河道配列構造の指標等を加味しながら、上述i)～xi)を全ブロックについて行い、流域最下流端における流出量系列 Q を算定する。

IV. 流出シミュレーション

流域が開発され土地利用が部分的あるいは全面的に変化する場合を想定し、流域の開発前後の流出形態の変化を上述の流域モデル構成法およびKiWSモデルIIに基づいて検討した一例を示す。図-4は、流域面積1.32km²の自然丘陵地流域において $u_* = 3$ としたときの流域モデルである。各ブロック左右岸の平均斜面長は185mである。いま、全流域が自然丘陵地である場合のモデル定数が図-5のように評価され、また流域開発に伴う流域表層の地文条件の変化に対応して、モデル定数のうち $a_1, a_2, b_1, z_{11}, z_{12}$ が図-6のように変化するものと仮定する。

また、流出シミュレーションに際して、入力降雨の単位時間 $\Delta t_r = 1800$ 秒、各ブロック斜面域の計算単位時間 $\Delta t_s = 900$ 秒、河道流の追跡単位時間 $\Delta t_c = 150$ 秒とした。

こうした流域開発前後の流出シミュレーション結果の例を図-7～9に示す。いずれの図においても、実線で示すCase Iのハイドログラフは、全流域が自然丘陵地である場合で、全ブロックとも図-5に示すモデル定数に

よる流出シミュレーション結果である。

図-7のCase IIは部分開発の例で、図-4の番号1～2の流域ブロックは図-5に示すモデル定数、番号3～7の流域ブロックは図-6に示すモデル定数による流出シミュレーション結果である。すなわち、上流側のブロック1～2が自然丘陵地、下流側のブロック3～7が開発された場合である。Case I, IIの流出波形に顕著な差異が認められ、ピーク流量は、Case Iで7.7m³/s、Case IIで8.6m³/sとなり、その発生時刻はCase IIの方が90分早く発生している。

また図-8のCase IIIも部分開発の例で、図-4の番号1～5の流域ブロックは図-6に示すモデル定数、番号6～7の流域ブロックは図-5に示すモデル定数によ

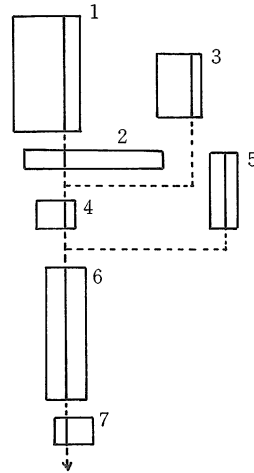


図-4 分布型流域モデルの一例 (N1方式, $u_* = 3$)

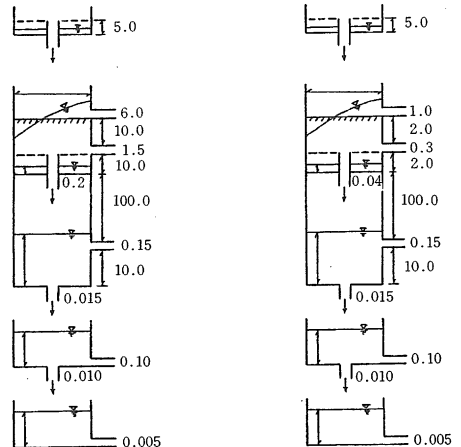


図-5 KiWSモデルIIのモデル定数 (開発前)

図-6 KiWSモデルIIのモデル定数 (開発後)

る流出シミュレーション結果である。すなわち、上流側のブロック1~5が開発され、下流側のブロック6~7が自然丘陵地の場合である。ピーク流量は、Case I の $7.7\text{m}^3/\text{s}$ に対し、Case III で $9.8\text{m}^3/\text{s}$ となり、その発生時刻は Case III の方が60分早く発生している。

また図-9は前述のCase I と、全流域が開発されたとするCase IV との比較である。この場合、第1のピーク流量は $10.1\text{m}^3/\text{s}$ 、第2のピーク流量も $9.5\text{m}^3/\text{s}$ と Case I の第1ピーク流量 $7.7\text{m}^3/\text{s}$ 、第2のピーク流量 $7.0\text{m}^3/\text{s}$ に対しそれぞれ30%、36%増となっている。またそれらの発生時刻は Case I と比較し、第1ピークは90分、第2ピークは120分早く発生している。

また、本解析において、入力降雨と有効降雨とから逆算して得られる雨水保留量曲線を開発前のブロックと開発後のブロックとで対比した例を図-10に示す。このように、本流出モデルでは、流域モデルの各ブロックの地目に応じた雨水保留量曲線が推定されることになる。したがって、本研究で意図した分布型流域モデルにおいて土地利用形態に則した流出モデル定数を入力条件とするのみならず、各ブロックの地目に応じた有効降雨を算定しつつ流出解析を実行しうることが示されたといえる。

V. あとがき

本報で提案した KiWS モデルIIにより、流域の開発に伴う複数の地目から構成される流域を対象にして、かつ直接流出および低水流出の両流出成分を合成した流出解析が可能であることが流出シミュレーションにより示さ

れた。むろん、水文観測資料に基づく本流出モデルの適用性の検証が必要であるが、これについては逐次検討していきたい。

本研究を遂行するにあたり、終始懇切なご指導と貴重なご助言をいただいた京都大学名誉教授角屋 睦先生、ならびに島根大学名誉教授田中礼次郎先生に心から謝意を表す。なお、本研究は文部省科学研究費補助金による研究成果の一部であることを付記する。

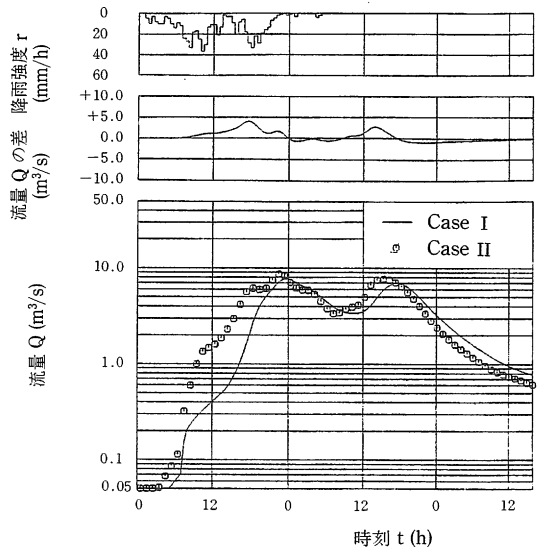


図-7 流出シミュレーション結果 (Case I, Case II)

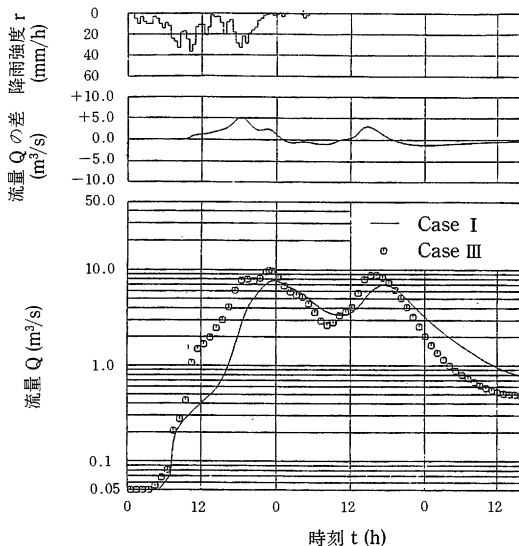


図-8 流出シミュレーション結果 (Case I, Case III)

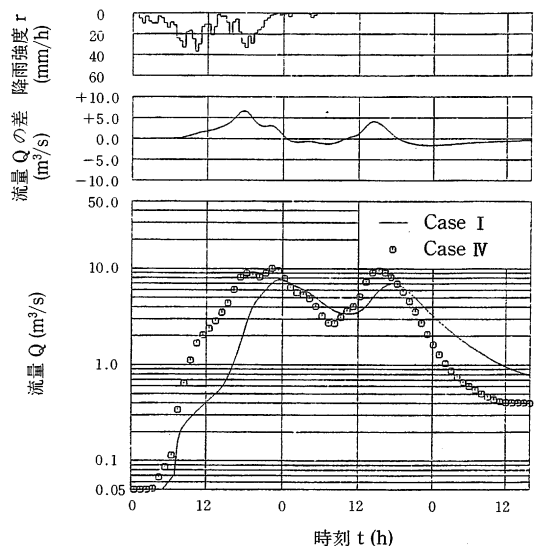


図-9 流出シミュレーション結果 (Case I, Case IV)

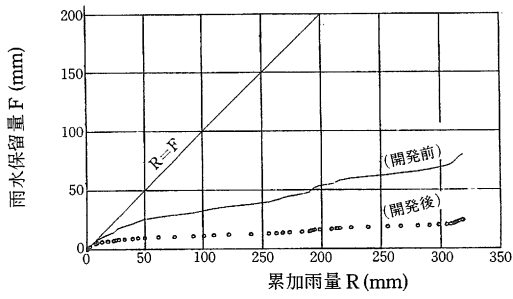


図-10 雨水保留量曲線

引用文献

- 1) 角屋 睦・永井明博：農土論集，**136**：31-38，1988.
- 2) 福島 晟：農土論集，**155**：35-42，1991.
- 3) 福島 晟：農土論集，**156**：41-50，1991.
- 4) 福島 晟：島大農研報，**25**：89-98，1991.
- 5) 福島 晟・田中礼次郎：島大農研報，**21**：78-87，1987.
- 6) 石原安雄・小葉竹重機：京大防災研年報，**14**(B)：131-141，1971.