

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

福島 晟*・田中礼次郎*

Runoff Model combined Kinematic Wave Runoff Model
and Storage Model for Analyzing Flood and Long Term Runoff

Akira FUKUSHIMA and Reijiro TANAKA

A runoff model named KWST model (Runoff Model combined Kinematic Wave and Storage Tanks) is developed as a clue for estimating the effective rainfall in the flood runoff analysis.

The upper zone of the model is composed by kinematic wave runoff model. The lower zone is the same with the storage model proposed by Kadoya and Nagai. The estimation method of the effective rainfall concerned in the surface runoff and/or subsurface runoff is shown in the model. It is possible to calculate by the model that the runoff component of the slope flow consists of either surface runoff or both surface and subsurface runoff. The applicability of the model is examined for the data observed at the River Hii, the area of land reclamation in Masuda, and Shimokari river basin. For the identification of the parameters, the SP method which is one of the mathematical optimization techniques is applied under the chi-square criterion of errors. The model agrees well with observed hydrographs for flood runoff. And the practical formulae for estimating the optimum model parameters are obtained.

1. ま え が き

自然丘陵地帯において大規模な農地造成事業が施工される場合、施工前後における高水および低水の流出形態の変化、ならびに経年的な雨水流出過程の変遷がどのようであるかを明らかにすることを目的とした試験流域が近年各地で設定され、そして、貴重な観測データにもと¹⁾²⁾³⁾づき、いくつかの興味ある報告がなされつつある。しかし、こうした試験流域で生起する水文事象を的確に把握し、それらを流出モデルとして表現し、かつ物理性を失

うことなくそのモデルパラメーターを設定し、たとえば、農地造成前後の洪水・渇水比流量特性を定量的に推定表現するという実用的解析手法の確立にはいたっていないように思える。

ところで最近、角屋・永井によって長短期流出両用モデルが開発提案されている⁴⁾⁵⁾。本流出モデルはいくつかの特徴を有しているが、特に Horton 型の浸透能式が組み込まれている構造となっていることにより、補給能モデルと等価な低水流出解析を可能とした点は本流出モデルの最大の特徴といえる。事実、実流域での応用例からも、十分満足できる流出モデルであることが実証されており、その実用的利用価値は高いといえる。

* 農業水工学研究室

唯、上述のように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としながら、さらに若干検討する余地が残されているように思える。本報告は前報⁶⁾⁷⁾に示した検討結果を踏まえ、上述のような課題に取り組もうとしたものである。

2. 流出モデル

角屋・永井法の長短期流出両用モデルには Manning 型表面流出成分を表現する構造が組み込まれているが、筆者らは前報で、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評価できないか等について若干検討した結果を報告した。前報⁷⁾で提案した流出モデルのうち、ここでは、図1に示す流出モデルにもとづいて検討することにする。本流出モデルは図2に示す角屋・永井法の長短期流出両用モデルにおいて、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。

以下、本流出モデルによる流出解析の基礎式および計算手順について述べる。

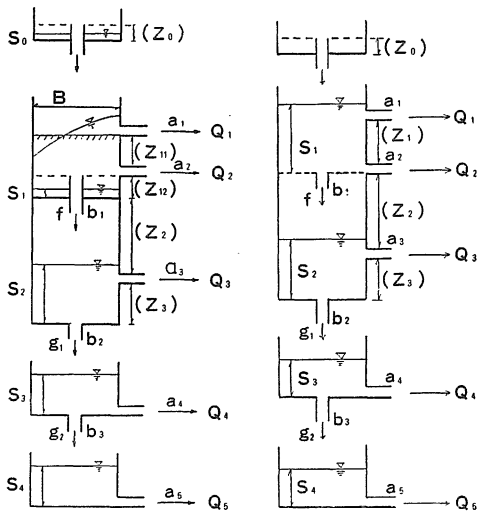


図1 流出モデル (集中型 KWST モデル)

図2 長短期流出両用モデル (角屋・永井法)

i) 表面流出高、速い中間流出高
 中間流、表面流型 キネマティック 流出 (kinematic runoff) モデルでは流域をいくつかのブロックに分割し、各ブロックの長方形斜面積の雨水流および河道部の流れが次式で表現できるものとしている。

$$\text{斜面流: } h = kq_s^p, \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = r_s \quad \dots\dots(1)$$

$$\text{河道流: } W = KQ^p, \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_I \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 h : 水深 (m), q_s : 斜面単位幅流量 (m^2/s), r_s : 有効降雨強度 (mm/h), W : 河道流積 (m^2), Q : 流量 (m^3/s), q_I : 河道単位長流入量 (m^2/s), t : 時間 (s), x : 距離 (m), k, p : 斜面流定数, K, P : 河道流定数。

斜面流定数 k, p は斜面流を Darcy 型中間流、あるいは Manning 型表面流とした場合それぞれに対し、次式のような意味を持っている。

$$\text{Darcy 型中間流: } k = 1/(k_I \cdot s/\lambda), p = 1 \quad \dots\dots(3)$$

$$\text{Manning 型表面流: } k = (N/\sqrt{s})^p, p = 3/5 \quad \dots\dots(4)$$

ここに、 k_I : 表層土の透水係数, λ : 表層の有効間隙率, s : 斜面勾配, N : 斜面の等価粗度。

また、河道流定数 K, P は次式で与えられる。

$$K = \left(\frac{n}{K_1^3 S^2}\right)^P, P = \frac{3}{3+2z} \quad \dots\dots(5)$$

ここに、 n : Manning の粗度係数, S : 河道勾配, K_1 , z は径深 R と流積 W との関係が $R = K_1 W^z$ で近似できると仮定したときの定数である。

また、Darcy 型中間流を計算する場合、表層内の見かけの水深を H とすると、 $h = \lambda H$ の関係がある。

図1の流出モデルではモデル定数 a_1 は(4)式の斜面流定数 k ないし等価粗度 N を、 a_2 は(3)式中の $k_I \cdot s/\lambda$ ないし k_I/λ を意味している。また、 z_{11} が中間流発生場の層厚 λD を表わしている。

ところで、図3に示すような流域ブロックを考えると、定常流のもとでは次式が成立する。

$$Q = 2q_s L = q_* A / 3.6 \quad \dots\dots(6)$$

$$A = 2BL \times 10^{-6} \quad \dots\dots(7)$$

ここに、 Q : ブロック末端流量 (m^3/s), q_s : 単位幅

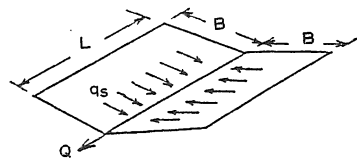


図3 流域ブロック

横流入量(m²/s), L : 河道長(m), q_* : 流出高(mm/h),
 A : 流域面積(km²), B : 平均斜面長(m).

したがって次式の関係が得られる.

$$q_* = \frac{\alpha_0 q_s}{B} = \frac{3.6Q}{A}, \alpha_0 = 3.6 \times 10^6 \quad \dots\dots(8)$$

そこで, 斜面末端部での単位幅横流入量 q_s , あるいはブロックの末端流量 Q をそれぞれ(1), (2)式にもとづいて算定すれば(8)式を利用して, 表面流出高 Q_1 , および中間流出高 Q_2 を求めることができる.

ii) 遅い中間流出高, 地下水流出高, 浸透高

角屋・永井法の長短期流出両用モデルによる表面流出高および早い中間流出高は(8)式の関係を用いると次式のように書き改められる.

$$Q_1 = \frac{\alpha}{B} \{(S_1 - z_1)/a_1\}^m \quad \dots\dots(9)$$

$$Q_2 = \frac{\alpha}{B} a_2 S_1 \quad \dots\dots(10)$$

ここに, S_1 : 貯留量(mm), z_1 : 流出孔の高さ(mm), Q_1 : 表面流出高(mm/h), Q_2 : 遅い中間流出高(mm/h), a_1 : 表面流モデルの斜面流動定数 k に相当する定数(m⁻¹・s³), a_2 : 中間流モデル定数 $k_I \cdot s/\lambda$ に相当する定数(cm/s), B : 平均斜面長(m), $m=5/3$, 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.

そこで, 角屋・永井法の長短期流出両用モデルの定義による遅い中間流出高, 地下水流出高, および浸透高についても同様に α, B を導入して書き改めると次のようになる.

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

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

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

$$f = B_1(z_2 + z_3 - S_2) = \frac{\alpha}{B} b_1(z_2 + z_3 - S_2) \quad \dots\dots(14)$$

$$g_1 = B_2 S_2 = \frac{\alpha}{B} b_2 S_2 \quad \dots\dots(15)$$

$$g_2 = B_3 S_3 = \frac{\alpha}{B} b_3 S_3 \quad \dots\dots(16)$$

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 : 浸透強度(mm/h), g_1, g_2 : 下段タンクへの供給量(mm/h), $A_3 \sim A_5, B_1 \sim B_3$: 角屋・永井法の定数, 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), $S_2 \sim S_4$: 第1段タンク下層~3段目タンク

の貯留量(mm),

z_2, z_3 : 流出孔の高さ(mm).

iii) 連続の式

$$\frac{dS_0}{dt} = r - r_a \quad \dots\dots(17) \quad \frac{dS_1}{dt} = r_a \quad \dots\dots(18)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = f - Q_3 - g_1 \quad \dots\dots(19) \quad \frac{dS_3}{dt} = g_1 - Q_4 - g_2 \quad \dots\dots(20)$$

$$\frac{dS_4}{dt} = g_2 - Q_5 \quad \dots\dots(21)$$

ここに, S_0 : 降雨遮断タンクの貯留量(mm), $S_0 \leq z_0$, S_1 : 第1段タンク上層の貯留量(mm)で, 流域地表面における凹地貯留量を表す. ただし $S_1 \leq z_{12}$, r : 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)

降雨遮断は次式の形が採用されている.

$$I = (z_0 - S_{00}) \{1 - \exp(-R/z_0)\} \quad \dots\dots(22)$$

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).

iv) 斜面流への有効降雨

前述 i) に示した雨水流モデルの基礎式を用い表面流出高, 中間流出高を算定しようとする場合, 斜面流に参与する降雨分, すなわち有効降雨をあらかじめ求めておかなばならない. 有効降雨の算定手順は以下のとおりである.

まず, 最上段タンクの初期水深 $S_0=0$ とし, 流域平均降雨 r_j (単位時間 Δt (秒)とし, 時刻 $t_{j-1} \sim t_j$ 間の降雨量(mm)) を与えながら, 式(22)を用い, 降雨遮断効果を受けた後の降雨量 $r_{a,j}$ を算定する. 次に第1段タンク上層部の貯留水深 S_1 の上限を z_{12} とし, $r_{a,j}$ より地表面凹地貯留量を差し引いた後の降雨量 $r_{e,j}$ を算定する. この部分の計算フローチャートを図4に示す. さらに, 第1段タンク下層への浸透能 f_j を式(14)より算定し, 前述の $r_{e,j}$ と大小関係を比較することにより斜面流への有効降雨量 $r_{s,j}$ を評価する. 浸透能 f_j はパラメータ b_1, z_2, z_3, S_2 の関数であり, また S_2 は式(14)に示す連続の式を満足しなければならないから, このモデルの最適同定がなされた時点で, 斜面流への有効降雨量 $r_{s,j}$ が算定されることになる. この $r_{s,j}$ の算定部分のみを抽出してフローチャートで示すと図5のようになる.

なお, $r_{a,j}, r_{e,j}, f_j, r_{s,j}$ の単位は mm/h で示してある. また図中の $S_{2,*}, f_*, Q_{3,*}, g_{1,*}$ の添字記号 *印は改良オイラー法による計算単位時間 Δt 内の平均値を意味し, 時刻 t_j における流出高, 浸透高はその時刻の貯留水深より算定しなければならない.

このようにして斜面流への有効降雨 $r_{s,j}$ を算定した後, 通常用いられている前述 2. i) の雨水流法を適用

し、表面流出高 Q_1 、ないし早い中間流出高 Q_2 を計算する。一方、第1段タンク下層よりの流出高 Q_3 、さらに第2、3段タンクよりの流出高 Q_4 、 Q_5 は図5の D \bar{O} 20 のループ内で計算するようにプログラミングすると、 $Q_j = \sum_{i=1}^5 Q_{ij}$ より時刻 t_j の流出高が算定される。

また、斜面流への有効降雨 $r_{s,j}$ が算定できたことにより、図1に示す流出モデルを分布型流出モデルに拡張して利用することができる。すなわち、流域をいくつかのブロックに分割し、各支流域の斜面域、河道部の雨水伝播過程を式(1)、(2)を基礎式とする雨水流法にもとづいて追跡計算することができる。

この場合、i) 斜面流を表面流のみとした場合、ii) 斜面流を中間流のみとした場合、iii) 斜面流を表面流および中間流が共存する流れとした場合の3種の計算法が考えられる。

このように、1) 角屋・永井法の長短期流出両用モデルを利用して、斜面流への有効降雨の算定、2) 角屋・永井法の第1段タンク下層、第2、3段タンクを用い、遅い中間流出高、地下水流出高の算定、3) 表面流出高、速い中間流出高を雨水流法により算定、4) 前述2)、3)の結果より全流出成分の和の算定という手順で、高水および低水を含めた流出計算が可能となる。

従来のように、保留量曲線を介して有効降雨を算定し

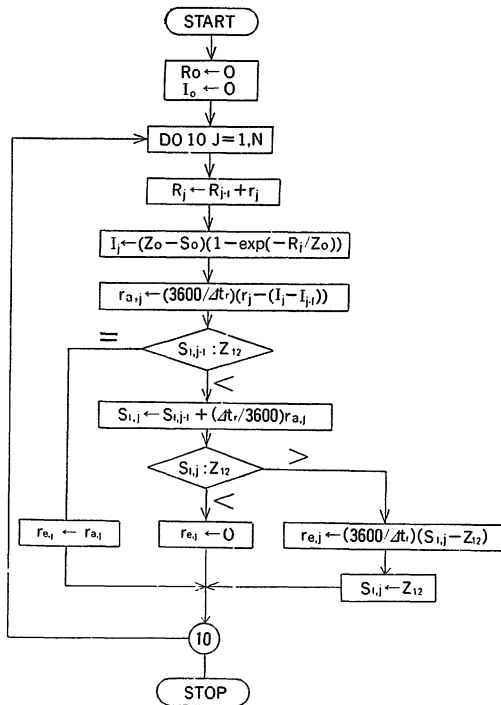


図4 $r_{e,j}$ の計算フローチャート

た後、雨水流法を適用する流出解析手法と区別する意味で、上述の解析手法を便宜上、KWST モデル (Runoff Model combined Kinematic Wave and Storage Tanks) と呼ぶことにする。かつ、図1のように河道流を考慮しない場合を集中型 KWST モデルとし、流域をいくつかのブロックに分割し、河道流計算も組み込んだ流出モデルを分布型 KWST モデルと略称することにする。

なお、モデル同定には SP 法を次式で表わされる χ^2 -基準で適用する。

$$J_{\chi^2} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{(Q_{ci} - Q_{oi})^2}{Q_{oi}} \rightarrow \min. \dots\dots\dots (23)$$

ここに、 J_{χ^2} : 誤差評価基準、 Q_{ci} : 計算流出高、 Q_{oi} : 観測流出高、 M : データ数。

さらに、次式で表わされる相対基準値(%) も計算し、併示することにする。

$$J_{RE} = \frac{100}{M} \sum_{i=1}^M \frac{|Q_{ci} - Q_{oi}|}{Q_{oi}} \dots\dots\dots (24)$$

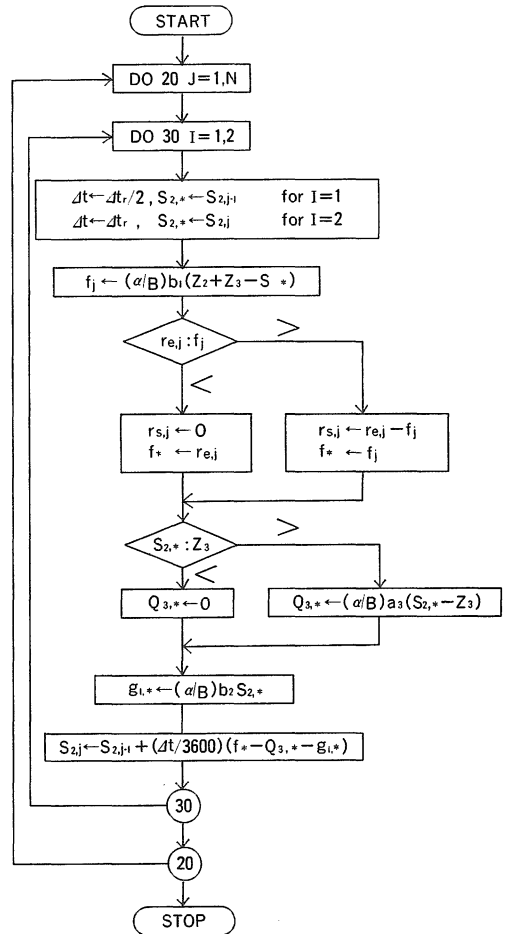


図5 有効降雨 $r_{s,j}$ の計算フローチャート

また、各モデル定数の制約条件として、角屋・永井の解⁹⁾によるペナルティ関数を準用することにする。

3. KWST モデルによる洪水流出解析事例

まず、斜面流を表面流のみとした場合の集中型 KWST モデルを2,3の実流域に適用した解析例について述べる。

図6は斐伊川水系の三刀屋地点(集水面積 $A=195.8 \text{ km}^2$)での出水に対して集中型 KWST モデルによって再現性を検討した例である。この場合、平均相対誤差は17.3%で観測ピーク流量 $398.4 \text{ m}^3/\text{s}$ に対し、計算ピーク流量は $363.2 \text{ m}^3/\text{s}$ と算定された。ハイドログラフの立上り部、ピーク部、低減部とも再現性は、ほぼ良好といえるが、唯、図中に示す計算流量 $Q_c(\text{m}^3/\text{s})$ 、観測流量 $Q_0(\text{m}^3/\text{s})$ との差 ($Q_c - Q_0$) の値をみると、やはりピーク部で計算値は過少評価される傾向にある。

図7は丘陵地帯を改良山成工により施工された益田市の農地造成域(集水面積 $A=0.296 \text{ km}^2$)における観測出水を対象に角屋・永井法の長短期流出両用モデルで解析した例である。また図8は同出水を集中型 KWST モデルで解析した例である。平均相対誤差は両解析例とも、それぞれ23.3%、23.4%と大差ないが、図7、8に示す計算流量 $Q_c(\text{m}^3/\text{s})$ と観測流量 $Q_0(\text{m}^3/\text{s})$ との差 ($Q_c - Q_0$) を比較すると集中型 KWST モデルの方が出水ピーク部の再現性が良好である。しかし、図8に示す集中型 KWST モデルによる解析結果も、一般的には観測値より計算値の方が、やはり過少評価の傾向にある。なお、同出水の観測ピーク流量 $8.32 \text{ m}^3/\text{s}$ に対し、集中型 KWST モデルによる計算ピーク流量は $7.40 \text{ m}^3/\text{s}$ と過少評価されているが、ピーク発生時刻は観測値と一致している。

図9は下狩川流域(集水面積 $A=1.3209 \text{ km}^2$)を対象に集中型 KWST モデルで解析した例である。観測値と計算値との平均相対誤差は4.1%であり、観測ピーク流量 $9.36 \text{ m}^3/\text{s}$ に対し、計算ピーク流量は $8.74 \text{ m}^3/\text{s}$ の結果を得、観測流出量ハイドログラフの再現性は十分といえよう。

KWST モデルのモデル定数 a_1 は前述2. i) に示したように、Manning 型表面流モデルの斜面流定数 k 、あるいは、 $k=(N/\sqrt{s})^3$ の関係を利用することにより、等価粗度 N を意味するモデル定数である。

そこで、 N, k に対応する a_1 をそれぞれ a_{1N}, a_{1k} と表示することにする。

ところで、下狩川流域では既に河道次数を基準に流域分割し、次数別の流域モデルを作成した後、流域モデルの lumping と表面流モデル定数との関係について検討

している。¹⁰⁾

流域を1ブロックとする基準次数 $U_*=6$ の流域モデルについての解析結果より、次のような値が得られた。すなわち、表面流モデルで算定される等価粗度 $N_{opt}=1.4$ 、斜面流定数 $k_{opt}=2.3$ に対し、集中型 KWST モデルでは、 $a_{1N}=2.31$ 、 $a_{1k}=3.00$ と算定され、集中型 KWST モデルによるモデル定数の値の方が大きく評価された。

さて、雨水流モデルによる流出解析に必要な有効降雨の推定に、雨水保留量曲線がよく利用される。そこで図9に示す解析例で算定された有効降雨と観測降雨とから流域保留量を逆算し、累加雨量と保留量との関係、いわゆる雨水保留量曲線を図示すると図10のようになる。

図10には角屋の改善法を適用して得られた保留量曲線も図示してある。本出水時の総雨量 196.0 mm に対して、総有効雨量は角屋の改善法では 138.8 mm 、集中型 KWST モデルを適用した場合は 136.8 mm とほとんど一致しているが、保留量曲線の形状はかなり相違している。

しかし、角屋の保留量曲線の改善法を適用して算定される単位時間ごとの有効降雨 $r_e(\text{mm}/\text{h})$ と集中型 KWST モデルによる有効降雨 $r_s(\text{mm}/\text{h})$ とから、 $\{(r_s - r_e)/r_e\} \times 100(\%)$ の値を算定すると図11の上段に示すように、流出量ハイドログラフピーク部を形成する時間帯においては、ほとんど差異がない結果となっている。このことは角屋・永井法の長短期流出両用モデルを利用して有効雨量を算定することの有用性を実証するものと評価できよう。また、図11の下段は観測降雨 r と集中型 KWST モデルによる有効降雨 r_s とを図示したものである。なお、この解析例は流域を1ブロックとしたときの平均斜面長 $B=546 \text{ m}$ 、および平均斜面勾配 $s=0.137$ を用いた計算値である。

図12, 13, 14は前述3流域で最適同定された集中型 KWST モデルを示したものである。なお流域間の比較のため、モデル定数 $a_{1k} \sim a_5, b_1 \sim b_3$ は角屋・永井法で示されている $A_1 = \frac{\alpha}{B} \left(\frac{1}{a_{1k}} \right)^m, A_2 = -\frac{\alpha}{B} a_2, \dots, B_1 = \frac{\alpha}{B} b_1, B_2 = \frac{\alpha}{B} b_2, \dots$ のように定数 $A_1, A_2, \dots, B_1, B_2, \dots$ の値に換算した値で示してある。

次いで、下狩川流域で流域を1ブロックでモデル化し、河道流の計算を組み入れた分布型 KWST モデルで解析すると、 $a_{1N}=2.17$ 、 $a_{1k}=2.88$ を得、前述の集中型 KWST モデルによる値より、やや小さく評価された。

なお分布型 KWST モデルによる流出解析において、表面流出、中間流出については通常の雨水流法にもとづいて斜面流、河道流の追跡計算を行い、遅い中間流出高

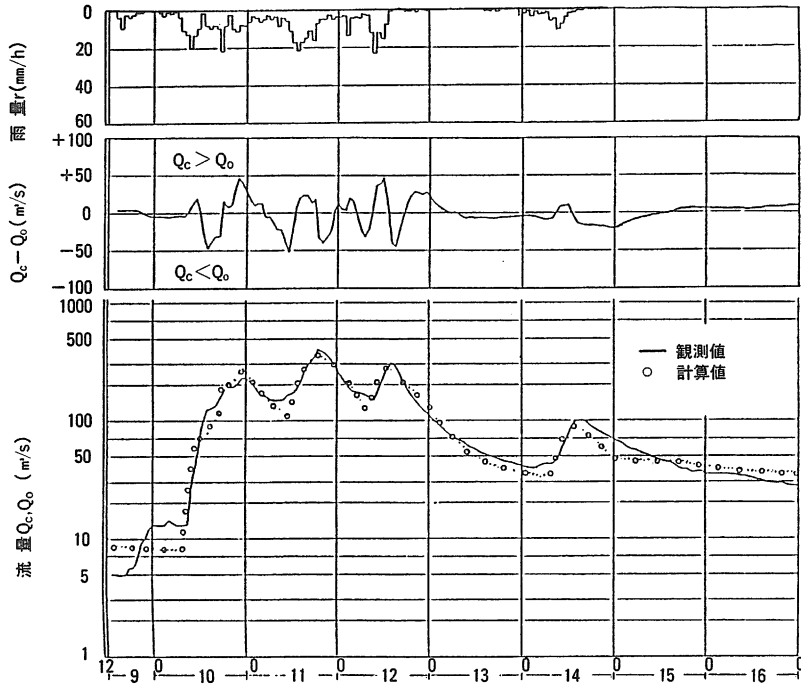


図6 集中型 KWST モデルによる解析例 (斐伊川水系, 三刀屋地点)
 ($\Delta t_r=3600\text{sec}$, $\Delta t_s=1800\text{sec}$, $B=3583\text{m}$, $A=195.8\text{km}^2$)

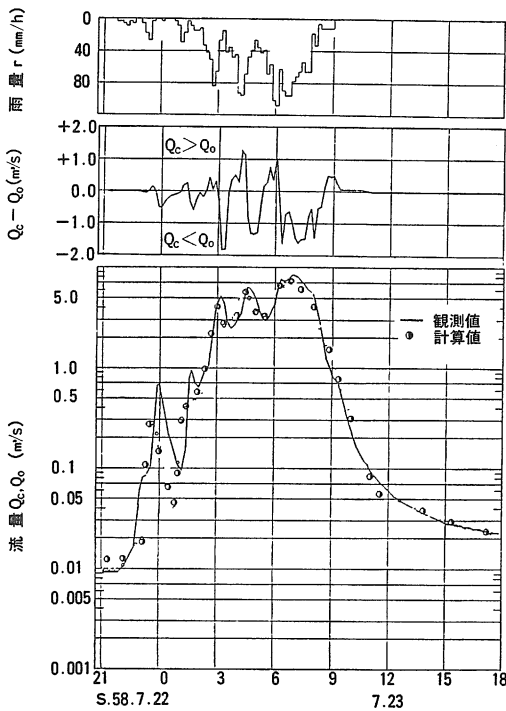


図7 角屋・永井法の長短期流出両用モデルによる解析例 (農地造成域)
 ($\Delta t=600\text{sec}$, $B=138\text{m}$, $A=0.296\text{km}^2$)

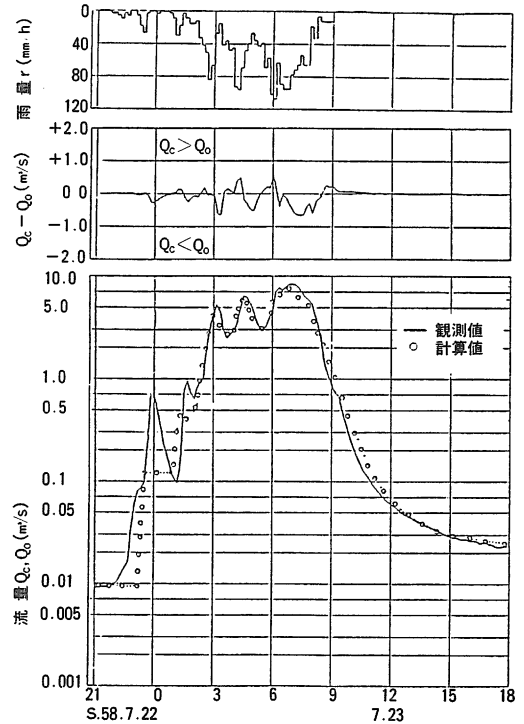


図8 集中型 KWSTモデルによる解析例 (農地造成域)
 ($\Delta t_r=600\text{sec}$, $\Delta t_s=300\text{sec}$, $B=138\text{m}$, $A=0.296\text{km}^2$)

Q_3 , 地下水流出高 Q_4, Q_5 は集中型 KWST モデルと同じ計算手法により算定し, 流域下流端でこれら各流出高の和を算定するという方法をとった. この際, モデル定数 $a_i (i=2\sim 5), b_i (i=1\sim 3)$ については j 次の流域モデルと l 次の流域モデルとの間に次式の関係が成立することを利用した.

$$\left(\frac{a_i}{B}\right)_j = \left(\frac{a_i}{B}\right)_l, \quad \left(\frac{b_i}{B}\right)_j = \left(\frac{b_i}{B}\right)_l \dots\dots\dots(25)$$

さらに表1は下狩川流域で各次数別流域モデルについて, 表面流モデルを適用して得られる最適等価粗度 N_{opt} および最適斜面流定数 k_{opt} と, それらに対応する KWST モデルの定数 a_{1N}, a_{1k} を比較したものである.

なお, 表1に示す a_{1N}, a_{1k} の値は $U_* = 6$ の集中型 KWST モデルで算定された有効降雨と同一の有効降雨を与えて, 最適同定したものである.

このように, モデル定数最適値は, 流域モデルの構成方法や, lumping によって変化する. このモデル定数の変化様相は, 流域モデルの基準次数 U_* では単純に表現しにくい, 代表斜面長 B_c (河道から斜面上流端にある長さ b_c をとったとき, そこに含まれる斜面面積が流域面積の50%となるような値を代表斜面長(m)とする)を用いると, 最小二乗法によって次式の関係が得られる.

集中型 KWST モデル : $a_{1N} = 2977 B_c^{-1.27} \dots\dots(26)$

〃 : $a_{1k} = 92 B_c^{-0.61} \dots\dots(27)$

分布型 KWST モデル : $a_{1N} = 910 B_c^{-1.08} \dots\dots(28)$

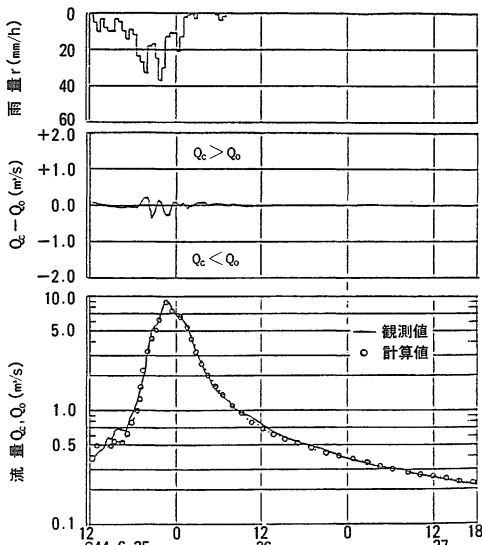


図9 集中型 KWST モデルによる解析例 (下狩川流域, $U_* = 6$)
($\Delta t_r = 1800\text{sec}$, $\Delta t_s = 900\text{sec}$, $B = 546\text{m}$, $A = 1.3209\text{km}^2$)

分布型 KWST モデル : $a_{1k} = 54 B_c^{-0.52} \dots\dots(29)$

また, 斜面域の表層厚 D を与え, 表層内の見かけの水深 H が D より小さいとき, 斜面流は中間流のみとし, $H > D$ のとき表面流が発生し, 中間流と表面流とが共存するという中間流・表面流複合モデルによって斜面流を追跡する手法を KWST モデルに組み入れた場合の流出解析も行った.

その結果, これらについても代表斜面長とモデル定数との間に次式の関係を得た.

集中型 KWST モデル : $a_{1N} = 2661 B_c^{-1.27} \dots\dots(30)$

分布型 KWST モデル : $a_{1N} = 859 B_c^{-1.09} \dots\dots(31)$

なお, これらの最適モデル定数は流域モデル $U_* = 6$ の分布型 KWST モデルで算定された有効降雨と同一の有効降雨を与えて最適同定したものである.

ところで, KWST モデルのモデル定数のうち $S_0 \sim S_2$ の初期値, $a_1 \sim a_3, b_1 \sim b_2, z_0 \sim z_3$ など斜面流への有効降雨算定に関係するモデル定数を最適同定の対象変数とした場合, 同一出水に対し各流域モデル構成ごとに異なった有効降雨を算定することになる. そこで, 上述に示した解析結果は $U_* = 6$ で最適同定されたモデル定数にもとづいて, 他の流域モデルについての解析には, a_1 ないし a_1, a_2 を同定対象の変数とした. 図15, 16, 17, 18に流域モデル $U_* = 6$ について最適同定された集中型, および分布型 KWST モデルを示しておく. なお,

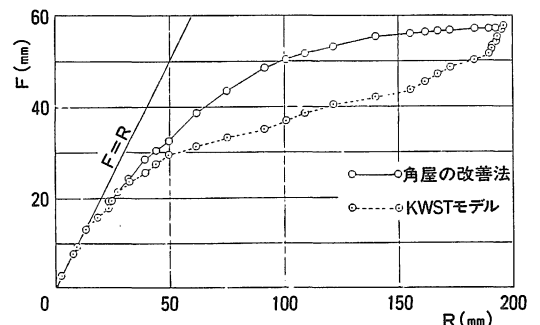


図10 雨水保留量曲線

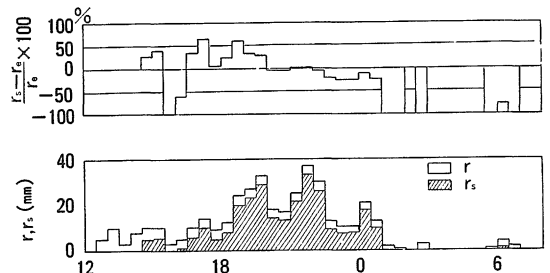


図11 観測降雨 r と有効降雨 r_s , および $\frac{r_s - r}{r} \times 100(\%)$

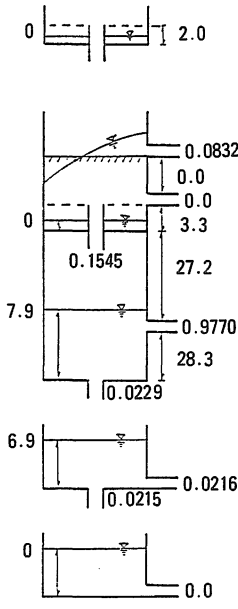


図12 集中型 KWST モデルの
モデル定数
(農地造成域, $B=138\text{m}$)

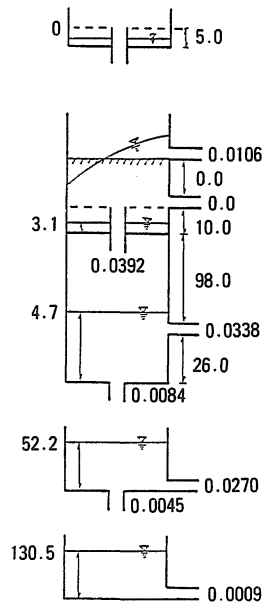


図13 集中型 KWST モデルの
モデル定数
(下狩川, N_1 方式, $U_* = 6$, $B = 546\text{m}$)

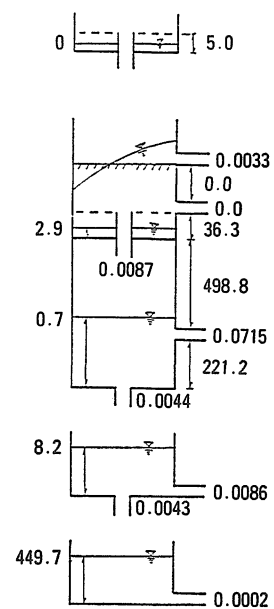


図14 集中型 KWST モデルの
モデル定数
(斐伊川水系三刀屋地点, $B = 3583\text{m}$)

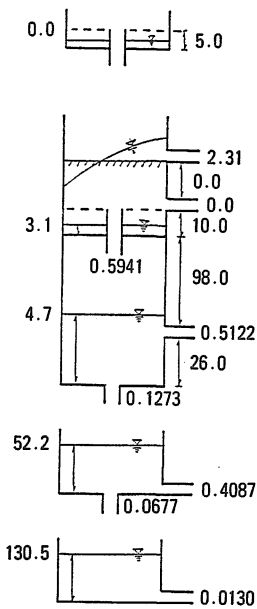


図15 集中型 KWST モデル
(表面流のみ)
($dt_r = 1800\text{sec}$, $dt_s = 900\text{sec}$)

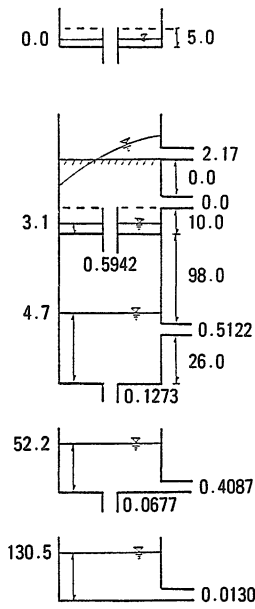


図16 分布型 KWST モデル
(表面流のみ)
($dt_r = 1800\text{sec}$, $dt_s = 900\text{sec}$,
 $dt_c = 150\text{sec}$)

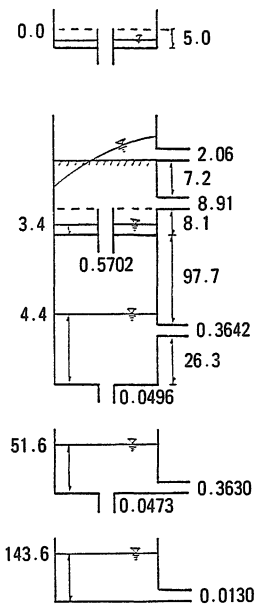


図17 集中型 KWST モデル
(表面流 + 中間流)
($dt_r = 1800\text{sec}$, $dt_s = 900\text{sec}$)

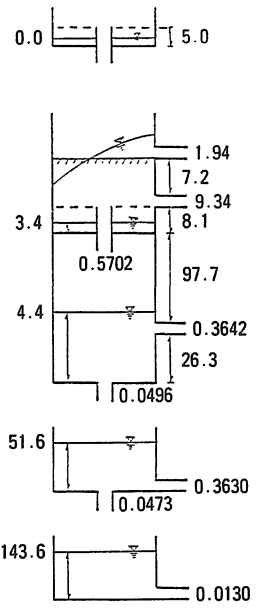


図18 分布型 KWST モデル
(表面流 + 中間流)
($dt_r = 1800\text{sec}$, $dt_s = 900\text{sec}$,
 $dt_c = 150\text{sec}$)

表1 流域モデルの基準次数 U_* と最適モデル定数との関係 (斜面流は表面流のみとした場合)

U_*	ブロック数	代表斜面長 B_c (m)	平均斜面長 B (m)	斜面勾配 s	表面流モデル		集中型KWST モデル		分布型 KWST モデル	
					N_{opt}	k_{opt}	a_{1N}	a_{1k}	a_{1N}	a_{1k}
1	62	33	63	0.396	13.4	6.4	34.05	10.96	21.78	8.84
2	20	50	96	0.345	8.0	5.0	20.86	8.52	13.19	6.83
3	7	95	185	0.269	4.0	3.4	9.57	5.75	6.41	4.68
4	3	155	304	0.199	2.6	2.8	5.01	4.27	3.95	3.72
5	2	217	415	0.154	1.9	2.6	3.23	3.54	2.83	3.26
6	1	273	546	0.137	1.4	2.3	2.31	3.00	2.17	2.88

図15, 16は斜面流を全て表面流のみとした KWST モデル, 図17, 18は斜面流を中間流, 表面流の共存する流れとした KWST モデルである。また, 各モデル定数は $a_1 = a_{1N}$, $a_2 = k_I/\lambda$, および式(11)~(14)に示す $a_3 \sim a_5$, $b_1 \sim b_3$ の値で表示してある。こうした流域モデルと流出モデルとの関係については, 一出水について得られたもので, 他の出水あるいは他流域での解析も含めて, なお検討すべき課題が残されている。

4. あとがき

角屋・永井によって提案された長短期流出両用モデルは, 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位置づけられるが, 実流域への応用にあたっては, なお検討課題とされている問題点も指摘されていた。ここでは 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推定できないか等について若干の検討を行った。その結果, 角屋・永井法の長短期流出両用モデルの降雨遮断タンク, および第1段タンク下層, 第2~第3段タンクはそのまま利用することにより, 表面流, 速い中間流を形成する斜面流成分への有効降雨算定法を示すことができた。

こうした有効降雨算定法を利用することにより, 洪水流出解析に用いられている雨水流モデルをそのまま角屋・永井法のモデルの第1段タンク上層部に組み込むことが可能となり, また同時に, 遅い中間流, 地下水流に關与する降雨分の時間的変化も自動的に算定することが可能となった。そして, この流出モデルを KWST モデルと呼ぶことにし, 集中型 KWST モデル, および分布型 KWST モデルの適応性を 2,3 の実流域で若干吟味することができた。

今後, こうした手法を基礎にして, 洪水比流量および

濁水比流量の地域特性, ないし持続特性, さらには流域の部分開発に伴う洪水流出, 低水流出への影響をより厳密に議論できるよう逐次検討したいと考えている。

最後に, 本研究をすすめるにあたり, 下狩川流域の水文資料を提供して頂き, かつ御指導を賜った京都大学防災研究所角屋睦教授, および計算, 資料整理に協力を賜った本学の門城祐司事務官, ならびに農業水工学専攻生の坂本智 (現, 島根県農林水産部), 小林長利君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, また数値解析には京都大学大型計算機センター FACOM M-382 システム, および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

- 小林慎太郎・田中丸治哉・丸山利輔: 農土論集, **113**: 1-7, 1984.
- 田中丸治哉・小林慎太郎・丸山利輔: 農土論集, **113**: 8-16, 1984.
- 田中丸治哉・角屋 睦・今成康忠: 昭和60年度農土講要旨集, 142-143, 1985.
- 永井明博・角屋 睦: 京大防災研年報, **26**(B-2): 261-272, 1983.
- 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.
- 福島 晨・田中礼次郎: 島大農研報, **19**: 77-86, 1985.
- 福島 晨・田中礼次郎: 島大農研報, **19**: 87-95, 1985.
- 永井明博・角屋 睦: 京大防災研年報, **23**(B-2): 239-247, 1980.
- 角屋 睦・永井明博: 農土学会誌, **48**(12): 51-59, 1980.
- 角屋 睦・福島 晨・佐合純造: 京大防災研年報, **21**(B-2): 219-233, 1978.