

雨水流モデルと長短期流出両用モデルを併合した 流出モデルによる流出解析法

福島 辰*・田中礼次郎*

A Method of Runoff Analysis by a Runoff Model combined Kinematic Wave
Runoff Model with Long and Short Terms Runoff Model

Akira FUKUSHIMA and Reijiro TANAKA

A lumped runoff model named KWST Model III (Runoff Model III combined Kinematic Wave and Storage Tanks) is developed for analyzing both flood and low water runoff successively.

Evapotranspiration in the KWST Model III is evaluated by a procedure adopted in the Long and Short Terms Runoff Model (LST Model) proposed by Kadoya and Nagai. The upper zone of the model is composed of kinematic wave runoff model. The lower zone is the same with the LST Model. The runoff from upper zone of the model corresponds to a direct runoff component which is composed of surface flow and/or prompt subsurface runoff. The effect rainfall formed the direct runoff component is estimated by utilizing the model structure of lower zone in the LST Model. A base flow in a runoff cycle is divided into five stages and seven lower water runoff patterns are defined.

Next, a procedure of runoff analysis is described to direct and low water runoff components. The storage of tanks which change every second in KWST Model III are expressed by solving the linear storage differential equations. The runoff height of low water correspond to storage of tanks is evaluated at every calculating unit time. The direct runoff height is estimated by kinematic wave runoff model which simulates surface runoff and/or prompt subsurface runoff.

Furthermore, indexes for a pattern of channel arrangement are defined, which substitute the arrangement structure of network for computer system. And it is shown that the indexes can be included in a runoff analysis and the lumped KWST Model III is possible to expand as a distributed one.

I. ま え が き

最近、長期流出と洪水流出を同時に扱う長短期流出両用モデルが角屋・永井によって、開発改良された¹⁾。本流出モデルは(i)一つのモデルで洪水流出と長期流出が連続して同時に解析可能、(ii)菅原のタンクモデルで物理性を欠くとされていた流域土壌水分の消長問題の解消、(iii)洪水流出波形を形成する有効降雨の自動的な推定機

能を持つモデル構造、(iv)必要単位時間のハイドログラフの再現が可能などの特徴を有している¹⁾。従来、洪水流出解析に際して有効降雨の推定が一つの大きな問題と指摘されていただけに、本流出モデルはたとえば、各種のダムにおける洪水のオンライン予測法に実用上十分に活用できるとして洪水予知の問題に新しい方向を与えつつある。

本報告は角屋・永井の長短期流出両用モデルにおいて

* 農業水文学研究室

表面流出成分と早い中間流出成分を形成する降雨分、すなわち直接流出成分への有効降雨が自動的に算定されるというモデル構造となっている点に着目し、従来の雨水流モデルによる洪水流出解析法に若干の改良を加えようと意図した研究の一部である。ここでは、前報²⁾で提示した流出モデル (*KWST* モデル) の構造を基礎にしつつ、蒸発散量の算定に角屋・永井の手法を適用した場合の流出モデルによる流出解析法について述べる。すなわち、月別平均日蒸発量の値を基本にして一定のルールで各段貯留タンクから日蒸発散量相当分を差し引くという蒸発散量の算定手法を *KWST* モデルに導入した場合の流出解析手法を述べる。また、本流出モデルを流域の河道配列特性を加味した分布定数型流出モデルへ拡張した場合の流出解析手法についても言及する。

II. 流出モデル

図-1(a) は角屋・永井により開発改良された長短期流出両用モデルである。また図-1(b)は前報²⁾で示した集中定数型 *KWST* モデルであり、本流出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、表面流、早い中間流に相当する斜面流には洪水流出解析における代表的モデルと目されている雨水流モデルを適用しようとする流出モデルである。なお、図-1(b)の最上段タンクは長短期流出両用モデルで定式化されている降雨遮断量効果を図示したものである。また、図-1(b)のように河道流を考慮しない場合を集中定数型 *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定数型 *KWST* モデルと略称することにする。

ここでは、前報で示した集中定数型 *KWST* モデルに長短期流出両用モデルで採用されている蒸発散量の算定手法を導入した場合の流出モデルを考えることにする。この場合、流出モデル構造は図-1(b)と同一であるが、蒸発散量の算定方式が前報²⁾の流出モデルと異なることにより、各段タンク貯留量および低水流出高の算定式を一部修正する必要がある。

以下、前報で提示した流出モデルを *KWST* モデルⅡ、本報で示す流出モデルを *KWST* モデルⅢと略称する。

長短期流出両用モデル、*KWST* モデルⅡ、および *KWST* モデルⅢの主な相違点は次のとおりである。

(1) 長短期流出両用モデルでは表面流出成分に対応する流出高 Q_1 、および中間流出成分に対応する流出高 Q_2 が第1段タンク上層部の貯留高 S_1 の関数で与えられるのに対し、*KWST* モデルⅡ、および *KWST* モデルⅢでは Q_1, Q_2 を雨水流モデルにより算定する。

(2) 長短期流出両用モデルでは各段タンク貯留高 $S_1 \sim S_4$ をそれぞれの微分貯留方程式にもとづき、計算単位時間毎に連続的に解く手法がとられている。なお、常微分方程式の解法に改良オイラー法が採用されている。一方、*KWST* モデルⅡ、および *KWST* モデルⅢでは長短期流出両用モデルの場合と同様に計算単位時間内で降雨強度が一定と仮定すると、各段タンク貯留高 $S_2 \sim S_4$ 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。

(3) 長短期流出両用モデルでは計算単位時間内の第1段目タンク下層部への雨水浸入強度 f は上層に f に見合うだけの十分な貯留量がある場合、下層の空容量に比例したある一定値として評価される。一方、*KWST* モデルⅡ、および *KWST* モデルⅢでは f は計算単位時間内においても Horton の浸透能式と同形の時間的変化をする形式で評価される。

(4) 長短期流出両用モデルでは降雨が終了しても、第1段目タンク上層部に貯留量がある限り、下層部への補給は継続するのに対し、*KWST* モデルⅡ、および *KWST* モデルⅢでは降雨終了とともに、第1段目タンク下層部への補給高 f は零となる。

(5) 長短期流出両用モデルの未知定数は $a_1 \sim a_5, b_1 \sim b_3, z_1 \sim z_3$ 、初期水深 $S_0^1 \sim S_0^4$ の合計14個である。ただし、同定初日には早い中間流出は発生しないものとして、第1段目タンク上層の初期水深 S_0^1 は零に固定し、

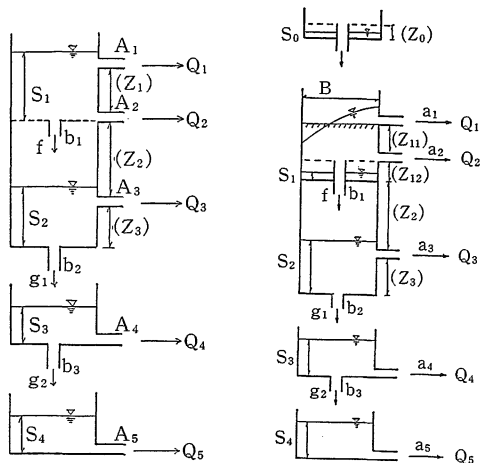


図-1(a) 長短期流出両用モデル

図-1(b) 集中定数型 *KWST* モデル

同定対象外としている。また、降雨遮断タンクは流域特性を考慮しつつ、必要に応じ設定される。

一方、KWST モデルⅡ、および KWST モデルⅢの未知定数は次に示すとおりである。

(i) 直接流出成分が表面流出成分のみで形成されるとする表面流モデルを適用する場合…… $a_1, a_3 \sim a_5, b_1 \sim b_3, z_{12}, z_2, z_3$, 初期水深 $S_0^1 \sim S_0^4$ の合計 14 個である。この場合、 z_{12} に一定値を与え、また長短期流出両用モデルと同様に S_0^1 を零に固定すれば未知定数は 12 個になる。

(ii) 直接流出成分が表面流出成分および早い中間流出成分の両成分で形成されるとする雨水流モデルを適用する場合…… $a_1 \sim a_5, b_1 \sim b_3, z_{11}, z_{12}, z_2, z_3$, 初期水深 $S_0^1 \sim S_0^4$ の合計 16 個である。この場合、 z_{12} を一定値とし、 S_0^1 を零に固定すれば未知定数は 14 個になる。

なお、上述 (i), (ii) ともに降雨遮断タンクの z_0 は一定値とし、初期水深 S_0^0 は零に固定する。

さて、集中型 KWST モデルⅢの降雨遮断タンク、および第 1 段タンク下層部～第 3 段タンクについての連続の式、降雨遮断量、流出高、浸透能、浸透高、蒸発散量は以下の式で与えられる。

(1) 連続の式

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS_0}{dt} &= r - r_a && \text{(for } S_0 < z_0 \text{ and } r \neq 0) \\ &= 0 && \text{(for } S_0 = z_0 \text{ and } r \neq 0) \\ &= -E_1' && \text{(for } 0 < S_0 \leq z_0 \text{ and } r = 0) \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS_1}{dt} &= r_a && \text{(for } 0 \leq S_1 < z_{12} \text{ and } r \neq 0) \\ &= 0 && \text{(for } S_1 = z_{12} \text{ and } r \neq 0) \\ &= -E_1' && \text{(for } S_0 = 0, 0 < S_1 \leq z_{12} \\ &&& \text{and } r = 0) \end{aligned} \right\} (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS_2}{dt} &= f_0 - Q_3 - g_1 - E_1' && \text{(for } S_2 \geq z_3) \\ &= f_0 - g_1 - E_1' && \text{(for } S_2 < z_3) \end{aligned} \right\} (3)$$

$$\frac{dS_3}{dt} = g_1 - Q_4 - g_2 - E_2' \quad \dots\dots (4)$$

$$\frac{dS_4}{dt} = g_2 - Q_5 - E_3' \quad \dots\dots (5)$$

ここに、 t : 時間 (h), S_0 : 降雨遮断タンクの貯留量 (mm), 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_0 : 第 1 段タンク上層部よりの補給高 (mm/h) で、(10) 式の浸透能 f (mm/h) で与えられる場合、および一定値 f_0 (mm/h) で与えられる場合の 2 通りを考えることにする。 $Q_3 \sim Q_5$: 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), g_1, g_2 : 下段タンクへの供給量 (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。

(2) 防雨遮断量

角屋・永井法で採用されている次式の形で樹木等による降雨遮断量を算定し、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 段タンク上層に¹⁾入力する。

$$I = (z_0 - S_0^0) \{1 - \exp(-R/z_0)\} \quad \dots\dots (6)$$

ここに、 I : 降雨遮断可能量 (mm), R : 累加雨量 (m), z_0 : 最大遮断量 (mm), S_0^0 : 初期貯留量 (mm)

(3) 流出高, 浸透能, 浸透高

$$Q_3 = A_3 (S_2 - z_3) = \alpha_1 a_3 (S_2 - z_3) \text{ (for } S_2 \geq z_3) \dots\dots (7)$$

$$Q_4 = A_4 S_3 = \alpha_1 a_4 S_3 \dots\dots (8), \quad Q_5 = A_5 S_4 = \alpha_1 a_5 S_4 \dots\dots (9)$$

$$f = B_1 (z_2 + z_3 - S_2) = \alpha_1 b_1 (z_2 + z_3 - S_2) \quad \dots\dots (10)$$

$$g_1 = B_2 S_2 = \alpha_1 b_2 S_2 \dots\dots (11), \quad g_2 = B_3 S_3 = \alpha_1 b_3 S_3 \dots\dots (12)$$

ここに、 $A_3 \sim A_5, B_1 \sim B_3$: 角屋・永井法の長短期流出両用モデルで定義されている定数 (h^{-1}), 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), $\alpha_1 = \alpha/B$, B : 平均斜面長 (m), 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。また、降雨強度、流出高、浸透高等を mm/d で表示する場合は $\alpha = 864$ となる。ただし、時間を日単位とする場合も、 $a_3 \sim a_5, b_1 \sim b_3, B$ の単位は変えないものとする。

(4) 蒸発散量

蒸発散に伴うタンク貯留量の減少強度は、長短期流出両用モデルで採用されている次式を用いる¹⁾。

$$E = \alpha_2 E_p = E_1 + E_2 + E_3 \quad \dots\dots (13)$$

$$E_1 = \delta \theta E, \quad E_2 = (1 - \delta) E, \quad E_3 = \delta(1 - \theta) E \dots\dots (14-1)$$

$$\left. \begin{aligned} \theta &= 1, S_0 > 0, S_1 > 0, \text{ or } S_2 \geq z_3 \\ &= S_2/z_3; S_1 = 0, \text{ and } S_2 < z_3 \end{aligned} \right\} \dots\dots (14-2)$$

ここに、 E_p : 各月の計器総蒸発量を月の時間数で割って得られる月平均蒸発強度 (mm/d), δ : 蒸発散の振

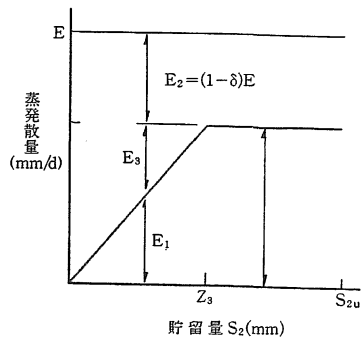


図-2 貯留量 S_2 と蒸発散量との関係

分比 (= 0.6), E_1, E_2, E_3 : 第1~3段タンクからの蒸発散量 (mm/d) (図-2), α_2 : 係数で無降雨日は常に $\alpha_2 = 1$, 降雨日の降雨時間帯は $\alpha_2 = 0$, 無降雨時間帯は $\alpha_2 = 1$ の値が用いられている. なお, 前述の連続の式の中の $E_1' \sim E_3'$ 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. 日単位で流出解析する場合には $E_1' \sim E_3'$ は $E_1 \sim E_3$ の値で置換される.

III. 流出サイクルと低水流出高のパターン

一連の降雨に対し河川流域で観測される一連のハイドログラフにおいて, 流出の1サイクルの時間長は時間軸でとなりあった2つの直接流出成分の終了時の時間間隔と定義されている³⁾.

いま, 集中定数型 KWST モデルⅢ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上述の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_0 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.

前述のように, 本流出モデルでは, 降雨終了とともに

表-1 流出サイクルの区分

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_0 (mm/h)	蒸発散量 E (mm/d)
1	$z_3 \leq S_2 \leq S_{2u}$	有	無	有
2	$0 \leq S_2 \leq z_3$	無	無	有
3	$0 \leq S_2 \leq z_3$	無	有	無
4	$z_3 \leq S_2 \leq S_{2u}$	有	有	無
5	$S_2 = S_{2u}$	有	有	無

表-2 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_0 (mm/h)	蒸発散量 E (mm/d)
1	1	$z_3 \leq S_2 \leq S_{2u}$	$Q_3 \neq 0$	$f_0 = 0$	$E \neq 0$
2	2	$0 \leq S_2 \leq z_3$	$Q_3 = 0$	$f_0 = 0$	$E \neq 0$
3	3-I	$0 \leq S_2 \leq z_3$	$Q_3 = 0$	$f_0 = f$	$E = 0$
4	3-II	$0 \leq S_2 \leq z_3$	$Q_3 = 0$	$f_0 = f_0$	$E = 0$
5	4-I	$z_3 \leq S_2 \leq S_{2u}$	$Q_3 \neq 0$	$f_0 = f$	$E = 0$
6	4-II	$z_3 \leq S_2 \leq S_{2u}$	$Q_3 \neq 0$	$f_0 = f_0$	$E = 0$
7	5	$S_2 = S_{2u}$	$Q_3 \neq 0$	$f_0 = f_c$	$E = 0$

第1段タンク下層部への補給高 f_0 は零となるモデル構造となっているため, 無降雨期間に相当するステージ1, 2では $f_0 = 0$ 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_0 として, i) 計算単位時間内に (10) 式で評価される浸透能 f に見合うだけの降雨が補給され, $f_0 = f$ で与えられる場合, ii) 計算単位時間内に浸透能 f に見合うだけの降雨がなく, f_0 が計算単位時間内の降雨量に規定され, $f_0 = f_0$ (一定値) で与えられる場合の2つの形式が考えられる. そこで, ステージ3, 4をステージ3-I, II, 4-1, 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_0 は後述の (58) 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-2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. 流出計算の単位時間を Δt としたとき, Δt 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. すなわち, Δt 毎に各段タンク貯留量, および低水流出高を算定していく上において, ステージ1では遷移①, ステージ3-I, IIでは遷移⑤, ステージ4-Iでは遷移⑧, ステージ4-IIでは遷移⑥, ⑧が Δt 内に発生するか否かを判断し, 処置することになる. なお, 図-3に示す遷移②, ③, ④, ⑦, ⑨, ⑩が発生し得るのは時間軸上で Δt 毎に刻まれた時刻である. したがって, Δt 毎に低水流出計算を進めていく上において, ステージ1で遷移②, ステージ2で遷移③, ステージ3-I, IIで遷移④, ステージ4-Iで遷移⑥, ⑦, ステージ4-IIで遷移⑦が Δt 内に発生するか否かの判断は不要である.

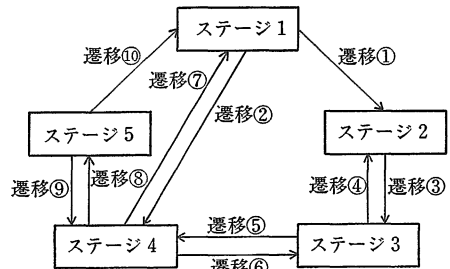


図-3 流出サイクルの区分と各ステージの遷移パターン

IV. 流出解析法

1. 流出解析の手順

集中定数型 *KWST* モデルⅢによる流出解析の手順は以下のとおりである。

i) まず計算単位時間 Δt 毎の流域への入力降雨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(6)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。なお、図-1(b)に示すように、第1段タンク上層部の貯留水深 S_1 の上限を z_{12} とする。 $S_1 = z_{12}$ 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。

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 内の平均浸透能である。 \bar{f} は(10)式および後述2.のタンク貯留量の関係を用いることにより、次式から算定される。

$$\bar{f} = \alpha_1 b_1 (z_2 + z_3 - \bar{S}_2) \quad \dots (15)$$

ここで、 \bar{S}_2 は時刻 $t \sim t + \Delta t$ 間の平均貯留量であり、低水流出のステージ3, 4, 5に応じ、後述2.の \bar{S}_2 に関する式で与えられる。

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 $f_g = f$ 、 $r_e \leq \bar{f}$ のときは $f_g = f_0 = r_e$ で与えられる。なお、 $r_e > \bar{f}$ のとき、 f_g は Δt 時間内で一定値 \bar{f} とするのではなく、後述の 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。

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

vii) 低水流出高 $Q_B = \sum_{i=3}^5 Q_i$ を算定する。

viii) 前述の直接流出成分への有効降雨 r_s を雨水流モデルへの入力として、直接流出高 Q_D を算定する。この場合、流域平均斜面長を B とし、斜面末端の流出量を流出高に換算するものとする。

ix) 流出高 $Q = Q_D + Q_B$ とした後、流量に換算し、時刻 $t + \Delta t$ における計算流量とする。

x) *SP* 法により流出モデルの最適同定を行う。

2. 低水流出成分の算定

(1) 各段タンク貯留量の算定

前項1.の低水流出への補給高 f_g の算定手法、および(3)~(5)、(7)~(14)式の関係を用いると、流出サイクルの各ステージにおける集中定数型 *KWST* モデルの第1段タンク下層部~3段タンクの貯留量 $S_2 \sim S_4$ の時間的変化についての定式化が可能となる。

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 後の時刻 $t + \Delta t$ における貯留量 $S_2(t + \Delta t) \sim S_4(t + \Delta t)$ および時刻 $t \sim t + \Delta t$ 間の平均貯留量 $\bar{S}_2(t + \Delta t) \sim \bar{S}_4(t + \Delta t)$ 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で生ずる蒸発散量は前述の角屋・永井の手法で評価されている。

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

$$S_2(t + \Delta t) = J_{51} \exp(-\lambda_0 \Delta t) + \zeta_{18} \quad \dots (16)$$

$$S_3(t + \Delta t) = J_{52} \exp(-\lambda_0 \Delta t) + J_{53} \exp(-\lambda_2 \Delta t) + J_{54} \quad \dots (17)$$

$$S_4(t + \Delta t) = J_{55} \exp(-\lambda_0 \Delta t) + J_{56} \exp(-\lambda_2 \Delta t) + J_{57} \exp(-\lambda_3 \Delta t) + J_{58} \quad \dots (18)$$

$$\bar{S}_2(t + \Delta t) = J_{51} [1 - \exp(-\lambda_0 \Delta t)] / \lambda_0 \Delta t + \zeta_{18} \quad \dots (19)$$

$$\bar{S}_3(t + \Delta t) = J_{52} [1 - \exp(-\lambda_0 \Delta t)] / \lambda_0 \Delta t + J_{53} [1 - \exp(-\lambda_2 \Delta t)] / \lambda_2 \Delta t + J_{54} \quad \dots (20)$$

$$\bar{S}_4(t + \Delta t) = J_{55} [1 - \exp(-\lambda_0 \Delta t)] / \lambda_0 \Delta t + J_{56} [1 - \exp(-\lambda_2 \Delta t)] / \lambda_2 \Delta t + J_{57} [1 - \exp(-\lambda_3 \Delta t)] / \lambda_3 \Delta t + J_{58} \quad \dots (21)$$

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

$$S_2(t + \Delta t) = S_2(t) \exp(-\lambda_7 \Delta t) \quad \dots (22)$$

$$S_3(t + \Delta t) = J_{59} \exp(-\lambda_7 \Delta t) + J_{60} \exp(-\lambda_2 \Delta t) - \zeta_{19} \quad \dots (23)$$

$$S_4(t + \Delta t) = J_{61} \exp(-\lambda_7 \Delta t) + J_{62} \exp(-\lambda_2 \Delta t) + J_{63} \exp(-\lambda_3 \Delta t) + J_{64} \quad \dots (24)$$

$$\bar{S}_2(t + \Delta t) = S_2(t) [1 - \exp(-\lambda_7 \Delta t)] / \lambda_7 \Delta t \quad \dots (25)$$

$$\bar{S}_3(t + \Delta t) = J_{59} [1 - \exp(-\lambda_7 \Delta t)] / \lambda_7 \Delta t + J_{60} [1 - \exp(-\lambda_2 \Delta t)] / \lambda_2 \Delta t - \zeta_{19} \quad \dots (26)$$

$$\bar{S}_4(t + \Delta t) = J_{61} [1 - \exp(-\lambda_7 \Delta t)] / \lambda_7 \Delta t + J_{62} [1 - \exp(-\lambda_2 \Delta t)] / \lambda_2 \Delta t + J_{63} [1 - \exp(-\lambda_3 \Delta t)] / \lambda_3 \Delta t + J_{64} \quad \dots (27)$$

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

$$S_2(t + \Delta t) = J_{14} \exp(-\lambda_4 \Delta t) + \zeta_{10} \quad \dots (28)$$

$$S_3(t + \Delta t) = J_{15} \exp(-\lambda_4 \Delta t) + J_{16} \exp(-\lambda_2 \Delta t) + J_{17} \quad \dots (29)$$

$$S_4(t + \Delta t) = J_{18} \exp(-\lambda_4 \Delta t) + J_{19} \exp(-\lambda_2 \Delta t) + J_{20} \exp(-\lambda_3 \Delta t) + J_{21} \quad \dots (30)$$

$$\bar{S}_2(t + \Delta t) = J_{14} [1 - \exp(-\lambda_4 \Delta t)] / \lambda_4 \Delta t + \zeta_{10} \quad \dots (31)$$

$$\bar{S}_3(t + \Delta t) = J_{15} [1 - \exp(-\lambda_4 \Delta t)] / \lambda_4 \Delta t + J_{16} [1 - \exp(-\lambda_2 \Delta t)] / \lambda_2 \Delta t + J_{17} \quad \dots (32)$$

$$\begin{aligned} \bar{S}_4(t+\Delta t) &= J_{18}\{1-\exp(-\lambda_4\Delta t)\}/\lambda_4\Delta t \\ &+ J_{19}\{1-\exp(-\lambda_2\Delta t)\}/\lambda_2\Delta t \\ &+ J_{20}\{1-\exp(-\lambda_3\Delta t)\}/\lambda_3\Delta t + J_{21} \dots\dots (33) \end{aligned}$$

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

$$S_2(t+\Delta t) = J_{22} \exp(-\lambda_5\Delta t) + J_{23} \dots\dots (34)$$

$$\begin{aligned} S_3(t+\Delta t) &= J_{24} \exp(-\lambda_5\Delta t) \\ &+ J_{25} \exp(-\lambda_2\Delta t) + J_{26} \dots\dots (35) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_4(t+\Delta t) &= J_{27} \exp(-\lambda_5\Delta t) + J_{28} \exp(-\lambda_2\Delta t) \\ &+ J_{29} \exp(-\lambda_3\Delta t) + J_{30} \dots\dots (36) \end{aligned}$$

$$\bar{S}_2(t+\Delta t) = J_{22}\{1-\exp(-\lambda_5\Delta t)\}/\lambda_5\Delta t + J_{23} \dots\dots (37)$$

$$\begin{aligned} \bar{S}_3(t+\Delta t) &= J_{24}\{1-\exp(-\lambda_5\Delta t)\}/\lambda_5\Delta t \\ &+ J_{25}\{1-\exp(-\lambda_2\Delta t)\}/\lambda_2\Delta t + J_{26} \dots\dots (38) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{S}_4(t+\Delta t) &= J_{27}\{1-\exp(-\lambda_5\Delta t)\}/\lambda_5\Delta t \\ &+ J_{28}\{1-\exp(-\lambda_2\Delta t)\}/\lambda_2\Delta t \\ &+ J_{29}\{1-\exp(-\lambda_3\Delta t)\}/\lambda_3\Delta t + J_{30} \dots\dots (39) \end{aligned}$$

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

$$S_2(t+\Delta t) = J_{31} \exp(-\lambda_6\Delta t) + S_{2u} \dots\dots (40)$$

$$\begin{aligned} S_3(t+\Delta t) &= J_{32} \exp(-\lambda_6\Delta t) \\ &+ J_{33} \exp(-\lambda_2\Delta t) + J_{34} \dots\dots (41) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_4(t+\Delta t) &= J_{35} \exp(-\lambda_6\Delta t) + J_{36} \exp(-\lambda_2\Delta t) \\ &+ J_{37} \exp(-\lambda_3\Delta t) + J_{38} \dots\dots (42) \end{aligned}$$

$$\bar{S}_2(t+\Delta t) = J_{31}\{1-\exp(-\lambda_6\Delta t)\}/\lambda_6\Delta t + S_{2u}$$

$$\begin{aligned} \bar{S}_3(t+\Delta t) &= J_{32}\{1-\exp(-\lambda_6\Delta t)\}/\lambda_6\Delta t \\ &+ J_{33}\{1-\exp(-\lambda_2\Delta t)\}/\lambda_2\Delta t + J_{34} \dots\dots (43) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{S}_4(t+\Delta t) &= J_{35}\{1-\exp(-\lambda_6\Delta t)\}/\lambda_6\Delta t \\ &+ J_{36}\{1-\exp(-\lambda_2\Delta t)\}/\lambda_2\Delta t \\ &+ J_{37}\{1-\exp(-\lambda_3\Delta t)\}/\lambda_3\Delta t + J_{38} \dots\dots (44) \end{aligned}$$

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

$$S_2(t+\Delta t) = J_{39} \exp(-\lambda_0\Delta t) + J_{40} \dots\dots (45)$$

$$\begin{aligned} S_3(t+\Delta t) &= J_{41} \exp(-\lambda_0\Delta t) \\ &+ J_{42} \exp(-\lambda_2\Delta t) + J_{43} \dots\dots (46) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_4(t+\Delta t) &= J_{44} \exp(-\lambda_0\Delta t) + J_{45} \exp(-\lambda_2\Delta t) \\ &+ J_{46} \exp(-\lambda_3\Delta t) + J_{47} \dots\dots (47) \end{aligned}$$

$$\bar{S}_2(t+\Delta t) = J_{39}\{1-\exp(-\lambda_0\Delta t)\}/\lambda_0\Delta t + J_{40} \dots\dots (48)$$

$$\begin{aligned} \bar{S}_3(t+\Delta t) &= J_{41}\{1-\exp(-\lambda_0\Delta t)\}/\lambda_0\Delta t \\ &+ J_{42}\{1-\exp(-\lambda_2\Delta t)\}/\lambda_2\Delta t + J_{43} \dots\dots (49) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{S}_4(t+\Delta t) &= J_{44}\{1-\exp(-\lambda_0\Delta t)\}/\lambda_0\Delta t \\ &+ J_{45}\{1-\exp(-\lambda_2\Delta t)\}/\lambda_2\Delta t \\ &+ J_{46}\{1-\exp(-\lambda_3\Delta t)\}/\lambda_3\Delta t + J_{47} \dots\dots (50) \end{aligned}$$

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

$$S_2(t+\Delta t) = S_{2u} \dots\dots (51)$$

$$S_3(t+\Delta t) = J_{48} \exp(-\lambda_2\Delta t) + J_{34} \dots\dots (52)$$

$$\begin{aligned} S_4(t+\Delta t) &= J_{49} \exp(-\lambda_2\Delta t) \\ &+ J_{50} \exp(-\lambda_3\Delta t) + J_{38} \dots\dots (53) \end{aligned}$$

$$\bar{S}_2(t+\Delta t) = S_{2u} \dots\dots (54)$$

$$\bar{S}_3(t+\Delta t) = J_{48}\{1-\exp(-\lambda_2\Delta t)\}/\lambda_2\Delta t + J_{34} \dots\dots (55)$$

$$\begin{aligned} \bar{S}_4(t+\Delta t) &= J_{49}\{1-\exp(-\lambda_2\Delta t)\}/\lambda_2\Delta t \\ &+ J_{50}\{1-\exp(-\lambda_3\Delta t)\}/\lambda_3\Delta t + J_{38} \dots\dots (56) \end{aligned}$$

ここで、 $\lambda_0 = \alpha_1(a_3+b_2)$, $\lambda_2 = \alpha_1(a_4+b_3)$, $\lambda_3 = \alpha_1a_5$, $\lambda_7 = \alpha_1b_2 + (\gamma E/z_3)$, $\lambda_4 = \alpha_1(b_1+b_2)$, $\lambda_5 = \alpha_1b_2$, $\lambda_6 = \alpha_1(a_3+b_1+b_2)$,

$$\zeta_{18} = \frac{\alpha_1 a_3 z_3 - \gamma E}{\lambda_0}, \quad \zeta_{19} = \frac{(1-\gamma)E}{\lambda_2}, \quad \zeta_1 = \frac{\alpha_1 b_2}{\lambda_0 - \lambda_2},$$

$$\zeta_2 = \frac{\alpha_1 b_2}{\lambda_2}, \quad \zeta_4 = \frac{\alpha_1 b_3}{\lambda_0 - \lambda_3}, \quad \zeta_5 = \frac{\alpha_1 b_3}{\lambda_2 - \lambda_3}, \quad \zeta_6 = \frac{\alpha_1 b_3}{\lambda_3},$$

$$\zeta_{20} = \frac{\alpha_1 b_2}{\lambda_7 - \lambda_2}, \quad \zeta_{21} = \frac{\alpha_1 b_3}{\lambda_7 - \lambda_3}, \quad \zeta_{22} = \frac{\gamma E}{(\lambda_7 - \lambda_3)z_3}, \quad \zeta_{23} = \frac{\gamma E}{\lambda_3},$$

$$\zeta_{10} = \frac{\alpha_1 b_1(z_2+z_3)}{\lambda_4}, \quad \zeta_{11} = \frac{\alpha_1 b_2}{\lambda_4 - \lambda_2}, \quad \zeta_{12} = \frac{\alpha_1 b_3}{\lambda_4 - \lambda_3},$$

$$\zeta_{13} = \frac{\alpha_1 b_2}{\lambda_5 - \lambda_2}, \quad \zeta_{14} = \frac{\alpha_1 b_3}{\lambda_5 - \lambda_3}, \quad \zeta_{15} = \frac{\alpha_1 b_2}{\lambda_6 - \lambda_2},$$

$$\zeta_{16} = \frac{\alpha_1 b_3}{\lambda_6 - \lambda_3}, \quad \zeta_{17} = \alpha_1 a_3 z_3,$$

$$J_{51} = S_2(t) - \zeta_{18}, \quad J_{52} = -\zeta_{19} J_{51}, \quad J_{53} = S_3(t) - J_{52} - J_{54},$$

$$J_{54} = \zeta_{20} \zeta_{18} - \zeta_{19}, \quad J_{55} = -\zeta_{21} J_{52}, \quad J_{56} = -\zeta_{22} J_{53},$$

$$J_{57} = S_4(t) - J_{55} - J_{56} - J_{58}, \quad J_{58} = \zeta_{23} J_{54}, \quad J_{59} = -\zeta_{20} S_2(t)$$

$$J_{60} = S_3(t) - J_{59} + \zeta_{19}, \quad J_{61} = -\zeta_{21} J_{59} - \zeta_{22} S_2(t)$$

$$J_{62} = -\zeta_{15} J_{60}, \quad J_{63} = S_4(t) - J_{61} - J_{62} - J_{64},$$

$$J_{64} = -\zeta_{16} \zeta_{19} - \zeta_{23}, \quad J_{14} = S_2(t) - \zeta_{10},$$

$$J_{15} = -\zeta_{11} J_{14}, \quad J_{16} = S_3(t) - J_{15} - J_{17}, \quad J_{17} = \zeta_{12} \zeta_{10},$$

$$J_{18} = -\zeta_{12} J_{15}, \quad J_{19} = -\zeta_{15} J_{16}, \quad J_{20} = S_4(t) - J_{18} - J_{19} - J_{21},$$

$$J_{21} = \zeta_{17} J_{17}, \quad J_{22} = S_2(t) - J_{23}, \quad J_{23} = f_0/\lambda_5,$$

$$J_{24} = -\zeta_{13} J_{22}, \quad J_{25} = S_3(t) - J_{24} - J_{26}, \quad J_{26} = \zeta_{22} J_{23},$$

$$J_{27} = -\zeta_{14} J_{24}, \quad J_{28} = -\zeta_{15} J_{25}, \quad J_{29} = S_4(t) - J_{27} - J_{28} - J_{30},$$

$$J_{30} = \zeta_{16} J_{26}, \quad J_{31} = S_2(t) - S_{2u}, \quad J_{32} = -\zeta_{15} J_{31},$$

$$J_{33} = S_3(t) - J_{32} - J_{34}, \quad J_{34} = \zeta_{22} S_{2u}, \quad J_{35} = -\zeta_{16} J_{32},$$

$$J_{36} = -\zeta_{15} J_{33}, \quad J_{37} = S_4(t) - J_{35} - J_{36} - J_{38}, \quad J_{38} = \zeta_{16} J_{34},$$

$$J_{39} = S_2(t) - J_{40}, \quad J_{40} = (f_0 + \zeta_{17})/\lambda_0, \quad J_{41} = -\zeta_{17} J_{39},$$

$$J_{42} = S_3(t) - J_{41} - J_{43}, \quad J_{43} = \zeta_{22} J_{40}, \quad J_{44} = -\zeta_{14} J_{41},$$

$$J_{45} = -\zeta_{15} J_{42}, \quad J_{46} = S_4(t) - J_{44} - J_{45} - J_{47}, \quad J_{47} = \zeta_{16} J_{43},$$

$$J_{48} = S_3(t) - J_{34}, \quad J_{49} = -\zeta_{15} J_{48}, \quad J_{50} = S_4(t) - J_{49} - J_{38},$$

降雨時、第1段タンク上層より浸透能 f の強度で下層に補給が継続し、蒸発散量は零とすると、貯留量 S_2 の上限値 S_{2u} は次式で与えられる。

$$S_{2u} = \frac{f_u - f_c}{\alpha_1 b_1} = \frac{b_1(z_2+z_3) + a_3 z_3}{a_3 + b_1 + b_2} \dots\dots (57)$$

$$f_u = \alpha_1 b_1(z_2+z_3),$$

$$f_c = \frac{\alpha_1 \{b_1 b_2(z_2+z_3) + a_3 b_1 z_3\}}{a_3 + b_1 + b_2} \dots\dots (58)$$

したがって、第1段タンク下層部より第2段タンクへの供給高 g_1 の上限値 g_{1u} は $g_{1u} = \alpha_1 b_2 S_{2u}$ で与えられる。そこで、この g_{1u} を(4)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。

$$S_{3u} = \frac{b_2(f_u - f_c)}{\alpha_1 b_1(a_4 + b_3)} \quad \dots\dots(59)$$

同様に、貯留量 S_4 の上限値 S_{4u} は次式で与えられる。

$$S_{4u} = \frac{b_2 b_3(f_u - f_c)}{\alpha_1 b_1 a_5(a_4 + b_3)} \quad \dots\dots(60)$$

(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 $S_2(t) \sim S_4(t)$ を既知としたとき、計算単位時間 Δt 後の貯留量 $S_2(t + \Delta t) \sim S_4(t + \Delta t)$ の算定が可能になった。そこで、これらの値を(7)～(9)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 $t + \Delta t$ における低水流出高 $Q_B(t + \Delta t)$ の算定式として以下の式が得られる。

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

$$\begin{aligned} Q_B(t + \Delta t) &= Q_3(t + \Delta t) + Q_4(t + \Delta t) + Q_5(t + \Delta t) \\ &= \eta_{28} \exp(-\lambda_0 \Delta t) + \eta_{29} \exp(-\lambda_2 \Delta t) \\ &\quad + \eta_{30} \exp(-\lambda_3 \Delta t) + \eta_{31} \quad \dots\dots(61) \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} Q_B(t + \Delta t) &= Q_4(t + \Delta t) + Q_5(t + \Delta t) \\ &= \eta_{32} \exp(-\lambda_7 \Delta t) + \eta_{33} \exp(-\lambda_2 \Delta t) \\ &\quad + \eta_{34} \exp(-\lambda_3 \Delta t) + \eta_{35} \quad \dots\dots(62) \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} Q_B(t + \Delta t) &= Q_4(t + \Delta t) + Q_5(t + \Delta t) \\ &= \eta_9 \exp(-\lambda_4 \Delta t) + \eta_{10} \exp(-\lambda_2 \Delta t) \\ &\quad + \eta_{11} \exp(-\lambda_3 \Delta t) + \eta_{12} \quad \dots\dots(63) \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} Q_B(t + \Delta t) &= Q_4(t + \Delta t) + Q_5(t + \Delta t) \\ &= \eta_{13} \exp(-\lambda_5 \Delta t) + \eta_{14} \exp(-\lambda_2 \Delta t) \\ &\quad + \eta_{15} \exp(-\lambda_3 \Delta t) + \eta_{16} \quad \dots\dots(64) \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} Q_B(t + \Delta t) &= Q_3(t + \Delta t) + Q_4(t + \Delta t) + Q_5(t + \Delta t) \\ &= \eta_{17} \exp(-\lambda_6 \Delta t) + \eta_{18} \exp(-\lambda_2 \Delta t) \\ &\quad + \eta_{19} \exp(-\lambda_3 \Delta t) + \eta_{20} \quad \dots\dots(65) \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} Q_B(t + \Delta t) &= Q_3(t + \Delta t) + Q_4(t + \Delta t) + Q_5(t + \Delta t) \\ &= \eta_{21} \exp(-\lambda_0 \Delta t) + \eta_{22} \exp(-\lambda_2 \Delta t) \\ &\quad + \eta_{23} \exp(-\lambda_3 \Delta t) + \eta_{24} \quad \dots\dots(66) \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} Q_B(t + \Delta t) &= Q_3(t + \Delta t) + Q_4(t + \Delta t) + Q_5(t + \Delta t) \\ &= \eta_{25} \exp(-\lambda_2 \Delta t) + \eta_{26} \exp(-\lambda_3 \Delta t) \\ &\quad + \eta_{27} \quad \dots\dots(67) \end{aligned}$$

ここに、 $\eta_{28} = \alpha_1(a_3 J_{51} + a_4 J_{52} + a_5 J_{55})$,
 $\eta_{29} = \alpha_1(a_4 J_{53} + a_5 J_{56})$, $\eta_{30} = \alpha_1 a_5 J_{57}$,
 $\eta_{31} = \alpha_1\{a_3(\zeta_{18} - z_3) + a_4 J_{54} + a_5 J_{58}\}$,
 $\eta_{32} = \alpha_1(a_4 J_{59} + a_5 J_{61})$,
 $\eta_{33} = \alpha_1(a_4 J_{60} + a_5 J_{62})$, $\eta_{34} = \alpha_1 a_5 J_{63}$,

$$\begin{aligned} \eta_{35} &= \alpha_1(a_5 J_{64} - a_4 \zeta_{19}), \quad \eta_9 = \alpha_1(a_4 J_{15} + a_5 J_{18}), \\ \eta_{10} &= \alpha_1(a_4 J_{16} + a_5 J_{19}), \quad \eta_{11} = \alpha_1 a_5 J_{20}, \\ \eta_{12} &= \alpha_1(a_4 J_{17} + a_5 J_{21}), \quad \eta_{13} = \alpha_1(a_4 J_{24} + a_5 J_{27}), \\ \eta_{14} &= \alpha_1(a_4 J_{25} + a_5 J_{28}), \quad \eta_{15} = \alpha_1 a_5 J_{29}, \\ \eta_{16} &= \alpha_1(a_4 J_{26} + a_5 J_{30}), \quad \eta_{17} = \alpha_1(a_3 J_{31} + a_4 J_{32} + a_5 J_{35}), \\ \eta_{18} &= \alpha_1(a_4 J_{33} + a_5 J_{36}), \quad \eta_{19} = \alpha_1 a_5 J_{37}, \\ \eta_{20} &= \alpha_1\{a_3(S_{2u} - z_3) + a_4 J_{34} + a_5 J_{38}\}, \\ \eta_{21} &= \alpha_1(a_3 J_{39} + a_4 J_{41} + a_5 J_{44}), \quad \eta_{22} = \alpha_1(a_4 J_{42} + a_5 J_{45}), \\ \eta_{23} &= \alpha_1 a_5 J_{46}, \quad \eta_{24} = \alpha_1\{a_3(J_{40} - z_3) + a_4 J_{43} + a_5 J_{47}\}, \\ \eta_{25} &= \alpha_1(a_4 J_{48} + a_5 J_{49}), \quad \eta_{26} = \alpha_1 a_5 J_{50}, \\ \eta_{27} &= \alpha_1\{a_3(S_{2u} - z_3) + a_4 J_{34} + a_5 J_{38}\} \text{である。} \end{aligned}$$

3. 直接流出成分の算定

前項2.により、流域への入力降雨 r から降雨遮断量、凹地貯留量、および第1段タンク下層への補給高を分離することにより、直接流出成分への有効降雨 r_s が算定できることを示した。次に、雨水流モデルを利用してこの r_s を直接流出成分に変換することを考える。

丘陵山地流域を解析対象とした場合、雨水流モデルでは直接流出成分が一様勾配にモデル化した斜面域で発生する斜面流により形成されるものとして解析される。

ところで、中間流、表面流型雨水流モデルによる斜面流は次式で表される。

$$h = kq_s^p, \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = r_s \quad \dots\dots(68)$$

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), t : 時間 (s), x : 距離 (m), k, p : 斜面流定数。

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。

$$\text{Darcy 型中間流: } k = 1/(k_R \cdot s/\lambda), \quad p = 1 \quad \dots\dots(69)$$

$$\text{Manning 型表面流: } k = (N/\sqrt{s})^p, \quad p = 3/5 \quad \dots\dots(70)$$

ここに、 k_R : 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。

図-1(b)の流出モデルにおいて、 α_1 は(70)式の斜面流定数 k ないし等価粗度 N を、 α_2 は(69)式中の $k_R \cdot s/\lambda$ ないし、 k/λ を意味している。また、 z_{11} が中間流発生場の層厚 λD を表している。

したがって、集中定数型 KWST モデルⅢにおいて、雨水流モデルを利用した直接流出成分の算定法として、

i) 斜面流を表面流のみとする場合、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する場合の3種が考えられる。蒸発散量の評価法が異なる集中定数型 KWST モデルⅡにおいても同様に直接流出成分の算定法として3種が考えられ

る。

また、雨水流モデルによる斜面末端部での単位幅流量 q_* は次式により、流出高 q_* (mm/h) に換算できる。

$$q_* = \alpha_0 q_s / B, \alpha_0 = 3.6 \times 10^6 \quad \dots\dots (71)$$

そこで、(68)式にもとづいて斜面末端部での単位幅流量 q_s を算定すれば、(71)式を用いて集中定数型 KWST モデルⅢの流出高 Q_1 ないし Q_2 に換算できる。

そして、直接流出高 Q_D は Q_1 と Q_2 の和として算定される。

ただし、直接流出成分の算定法として上述の3ケースを考えると第1段タンク上層部の流出モデル定数は以下のようになる。

ケース 1：斜面流を表面流のみとする場合、 $a_1 = k$ 、または N 、また $a_2 = 0$ 、 $z_{11} = 0$ とし、 $Q_2 = 0$

ケース 2：斜面流を中間流のみとした場合、 $a_1 = 0$ 、 $Q_1 = 0$ 、 $a_2 = k_I \cdot s / \lambda$ または k_I / λ 、 $z_{11} \neq 0$

ケース 3：斜面流を表面流および中間流が共存する流れとする場合、 $a_1 = k$ 、または N 、また $a_2 = k_I \cdot s / \lambda$ または k_I / λ 、 $z_{11} \neq 0$

V. 河道配列の指標と分布定数型流出モデル

図-1(b) に示す定数集中型 KWST モデルを定数分布型 KWST モデルに拡張して流出解析することを考える。すなわち、KWST モデルにおける直接流出成分の算定法として、流域をいくつかのブロックに分割し、各ブロックの斜面域、河道部の雨水流出過程を雨水流モデル法にもとづいて追跡計算する手法を採用する。その際、流域分割は河道網系を Strahler 方式、あるいは N_1 方式で次数化した後、次数 u の集水域を単位流域として流域分割する手法を用いることにする⁵⁾。こうして得られる流域モデル構成を u_* 次流域モデルとする。

こうした定数分布型 KWST モデルによる流出解析を電子計算機で行おうとする場合、流域の河道網系構造を電子計算機システムで処理し得る手法が必要となる。これに関しては、高棹・椎葉の研究⁶⁾がある。そこでは河道網系の構造を識別する指標として河道配置数を定義し、流域の地形構造を電子計算機システムに置換する系統的な手法が展開されている。

ところで、流出計算する上において、下記 i) ~ iii) のような点が指摘できる。

i) 上述の河道次数を基準に流域分割して得られる流域モデルは流域の複雑な地形構造を反映し、種々の河道配列パターンを示す。また、流域分割する基準次数 u が小さいほど分割ブロック数が多くなり、計算量も飛躍的に増大する。その結果、利用する電子計算機によって

は記憶容量の制限を受け、解析対象とする流出期間の計算ができない。

ii) 河道網系を N_1 方式で次数化して得られる流域モデルの場合、Strahler 方式の場合のように内側ブロック上流端で必ず2本の河道が合流するとは限らない。たとえば、図-4に示すような河道配列からなる流域モデルのブロック構成が得られたとする。この場合、番号3, 7, 8の内側ブロックでは上流端で2本の河道が合流するのに対し、番号4, 10の内側ブロックでは上流端で1本の河道が流入するのみである。

iii) 河道網系の次数化方式のいかんにかかわらず、図-4の番号12のブロックのように上流端で3本の河道が合流するブロックがある。ここでは、これらの点を考慮し、以下のような手法により電子計算機による流出計算の簡便化を図る。

1. 河道配列および河道合流パターンの指標

I 番目ブロックに対し、河道配列および河道合流パターンの指標をそれぞれ $IA(I)$ 、 $IB(I)$ とし、以下のようにしてその値を決定する。

1) 主河道最上流端のブロック番号を $No.1$ とする。

以下、下流ブロックに順次ブロック番号をつける。ただし、支川合流部ではその支川流域での主流最上流ブロックから順次ブロック番号をつける。また、支川流域内でさらに支川が合流する場合も同様とする。たとえば、図-4に示す流域ブロック構成をなす流域モデルの場合、図中の数字のようにブロック番号が定められる。

2) 各ブロックについて河道配列の指標 $IA(I)$ を表-3に示す記号およびそれに対応する数値0, 1の組合せによって定める。たとえば、図-4のブロックNo.1は外側ブロックでかつ主河道部であるから記号 E_m 、指標 $IA(1) = 11$ で表される。表-4の第2, 3欄に図-4の流域モデル構成に対する各ブロックの記号および $IA(I)$ の値を示す。ただし、ブロックNo.1, 3, 4, 8,

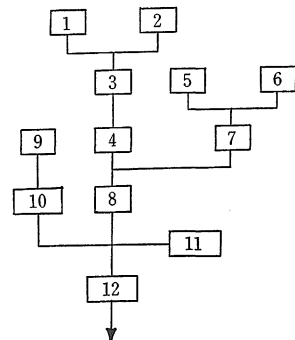


図-4 流域モデルのモデル構成

12を主河道ブロックとする。

3) 流域ブロック図において、ブロック $(I-1)$ と I との結合形式は上記 2) で定めた河道配列の指標 $IA(I)$ を用いると、表-5に示すように11個の形式に分類される。ただし、結合形式No.1はブロック番号1に該当する。また、第3欄の IG は $IG = IA(I-1) \times 100 + IA(I)$ で与えられる数値である。

4) ブロック I の上流端に流入する河道合流パターンによって、表-5の第(5)欄に示す河道合流の指標 $IB(I)$ を求める。すなわち、外側ブロックおよび図-5(a), (b)のように I ブロックへの流入河道数が1本であるブロックは $IB(I) = 1$ 、また図-5(c)~(h)のように I ブロックへの流入河道数が2または3本するとき、それぞれ $IB(I) = 2, 3$ とする。ただし、図-5(a)~(h)においてブロック番号1は $(I-1)$ ブロックを、ブロック番号2は I ブロックを示すものとする。したがって、図-4に示す流域モデルの各ブロックに対しては、表-

表-3 流域ブロックの記号とその指標

ブロックの分類	記号	指標
外側ブロック	E	1
内側ブロック	I	0
主河道部のブロック	m	1
支川流域のブロック	s	0

4に示す $IB(I)$ の値が得られる。なお、ここではブロック上流端での合流河道数を0~3としたがそれ以上の場合にも上述の手法が拡張できる。

2. 河道網パターンの指標の流出計算への応用

図-4のように任意の次数 u を基準に流域分割し、流域モデルのブロック構成を得たものとする。そして、最上流ブロックから逐次各ブロックの流出量系列を求め、最下流ブロックからの流出量系列を求めるまでの過

表-4 河道網系の指標

ブロック番号	ブロック記号	指標	
		$IA(I)$	$IB(I)$
$I = 1$	E_m	11	1
$= 2$	Es	10	1
$= 3$	I_m	1	2
$= 4$	I_m	1	1
$= 5$	Es	10	1
$= 6$	Es	10	1
$= 7$	Is	0	2
$= 8$	I_m	1	2
$= 9$	Es	10	1
$= 10$	Is	0	1
$= 11$	Es	10	1
$= 12$	I_m	1	3

表-5 河道網系構造の分類とその指標 IG, IB 、および河道流入流出量系列の記憶場所

(1) 分類番号	(2) 型	(3) IG	(4) 上流端合流点	(5) IB	(6) 合流点での流入量系列の計算	(7) 流出量系列 $Q_{j,k}$ の j
1	E_m	11	無	1	_____	1→ j
2	E_mE_s	1110	無	1	_____	2→ j
3	E_mI_m	1101	無	1	_____	1→ j
4	$EsEs$	1010	無	1	_____	$j+1$ → j
5	EsI_m	1001	有	2	$(Q_{1,k} + Q_{2,k}) \rightarrow Q_{1,k}$	1→ j
			有	3	$(Q_{1,k} + Q_{2,k} + Q_{3,k}) \rightarrow Q_{1,k}$	1→ j
6	$EsIs$	1000	無	1	_____	($I-1$)のブロックと同じ
			有	2	$(Q_{j-1,k} + Q_{j,k}) \rightarrow Q_{j-1,k}$	$j-1$ → j
			有	3	$(Q_{j-2,k} + Q_{j-1,k} + Q_{j,k}) \rightarrow Q_{j-2,k}$	$j-2$ → j
7	I_mE_s	110	無	1	_____	2→ j
8	I_mI_m	101	無	1	_____	1→ j
9	$IsEs$	10	無	1	_____	$j+1$ → j
10	IsI_m	1	有	2	$(Q_{1,k} + Q_{2,k}) \rightarrow Q_{1,k}$	1→ j
			有	3	$(Q_{1,k} + Q_{2,k} + Q_{3,k}) \rightarrow Q_{1,k}$	1→ j
11	$IsIs$	0	無	1	_____	($I-1$)のブロックと同じ
			有	2	$(Q_{j-1,k} + Q_{j,k}) \rightarrow Q_{j-1,k}$	$j-1$ → j
			有	3	$(Q_{j-2,k} + Q_{j-1,k} + Q_{j,k}) \rightarrow Q_{j-2,k}$	$j-2$ → j

程を考える。

前述の河道配列および河道合流パターンの指標 $IA(I)$, $IB(I)$ を利用すると、以下のようにして所定の流出量系列を算定することができる。

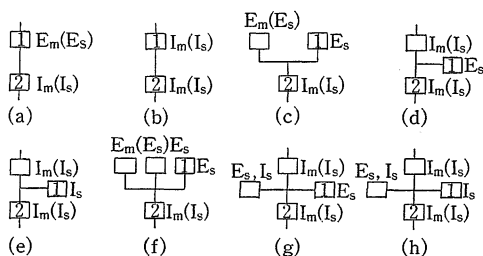


図-5 流域ブロックの結合形成

1) 各流域ブロック上, 下流端における河道流入流出量系列を記憶する配列 $Q(j, k)$, ($j = 1, 2, \dots, J, k = 1, 2, \dots, K$) を定義する。ここに, J は河道配列形態によって異なるが, $u_* = 1$ の流域モデルの場合, J は Strahler 方式の最大次数に等しいか, あるいはそれより1大きい程度の値となる。また, K は河道流入流出量系列の長さである。

2) 主河道部のブロック下流端における流出量系列は $Q(1, k)$ に記憶し, 主河道から支川へ分岐するごとに j の値を1増加させた後, $Q(j, k)$ に記憶する。

3) ブロック $(I-1)$ とブロック I の IA の値から $II = IA(I-1) \times 100 + IA(I)$ で算定される II を求める。さらに, この II とブロック I の $IB(I)$ の値とから, ブロック I が表-5 に示すいずれの IG および IB の値の組合せと一致するタイプかを探索する。このとき, $IB(I) = 2, 3$ の場合は表-5 の第(6)欄に示すようにしてブロック I の上流端からの河道流入量系列を算定する。たとえば, 第(6)欄で $(Q_{1,k} + Q_{2,k}) \rightarrow Q_{1,k}$ は $Q(1, k)$ と $Q(2, k)$ の和を河道流入量系列 $Q(1, k)$ に記憶することを意味する。

4) ブロック I の下流端における河道流出量系列 $Q(j, k)$ を記憶するときの j の値は表-5 の第(7)欄に示す。たとえば, 第(7)欄で $1 \rightarrow j$ は $j = 1$ とすることを意味する。

5) 上記1)~4)の操作をブロック $I = 1$ から順次繰り返せば, 各ブロックの河道流入流出量系列が計算できる。

すなわち, 解析対象流域の流域モデルにおいて, i) ブロック番号, ii) 河道網の指標 $IA(I)$, $IB(I)$ を定め, これを河道網構造の入力データとして与えれば, 複

雑な流域モデルにおいても, 図-6 に示す手順で流出計算することができる。

このように複数ブロックから構成される流域モデルにおいても, 河道流入流出量系列が容易に算定可能となったので, 集中定数型 $KWST$ モデルを分布定数型 $KWST$ モデルに拡張して流出解析することができる。なお, こうした河道網系構造の指標は雨水流モデルによる洪水流出解析においても同様に組み込むことができる。

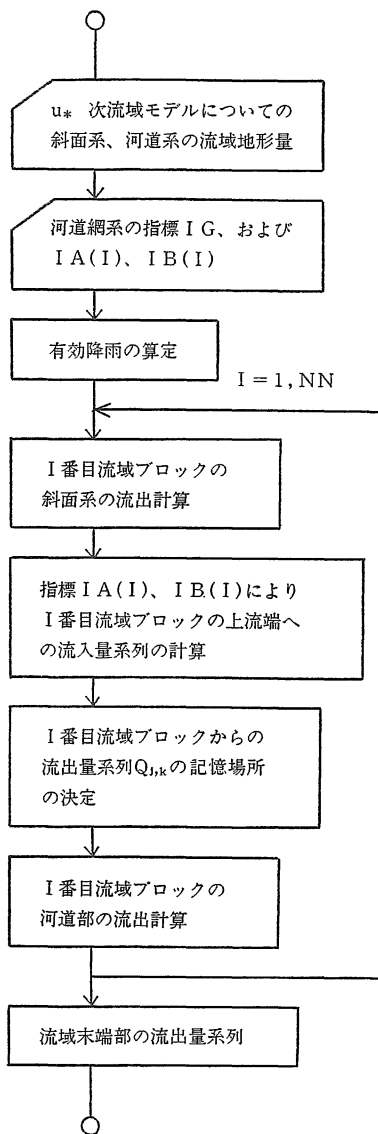


図-6 流出計算の手順

VI. あとがき

長期流出と洪水流出を同時に一つのモデルで解析し得る角屋・永井の長短期流出両用モデルは洪水流出解析に付随する有効降雨の問題を解消した流出モデルであり、実用上価値あるモデルとして検証されている。

本報では長短期流出両用モデルで自動的に有効降雨が評価されるというモデル構造に着目し、長短期流出両用モデルと雨水流モデルを併合した流出モデル（集中定数型 *KWST* モデル）を新たに提示するとともに、本流出モデルによる流出解析法について述べた。また、複雑な河道配列を示す流域においても、流域の河道配列パターンの指標を導入することによって、流出計算が簡便化し得ることを示した。これに伴って、集中定数型 *KWST* モデルを分布定数型 *KWST* モデルに拡張して流出解析することも可能となった。

本流出解析法では洪水時の直接流出成分を形成する降雨分、いわゆる有効降雨が自動的に算定される。したがって、雨水流モデルによる洪水流出解析において、従来の雨水保留量曲線を介して算定するという有効降雨の推定法が改善されると考える。また、本流出解析法の適用

により、たとえば流域特性とモデル定数との対応関係の吟味、あるいは土地利用形態の変化に伴う流出の変化予測などの問題がより合理的に検討できるものと期待している。今後、こうした問題に逐次検討を加えたいと考えている。

最後に本研究をすすめるにあたり、御指導を賜った京都大学防災研究所角屋陸教授に深く謝意を表する次第である。また、本報告は昭和63年度文部省科学研究費による研究成果の一部であることを付記する。

参 考 文 献

1. 角屋陸・永井明博：農土論集，136：31-38，1988.
2. 福島晟・田中礼次郎：島根大農研報，21：78-87，1987.
3. 土木学会：土木工学ハンドブ(上)：495，1974.
4. 永井明博・角屋陸：京大防災研年報，22：B-2：209-224，1979.
5. 角屋陸・福島晟・佐合純造：京大防災研年報，21 B-2：219-233，1979.
6. 高棹琢馬・椎葉充晴：土木論集，248：69-82，1976.