Bull. Fac. Life Env. Sci. Shimane Univ., 10：37－46, August 31, 2005

遅延入力降雨系列を用いた貯留型流出モデルとその適用例

福島　晟・武田育郎・宗村広昭

A Storage-based Runoff Model using the Delayed Input Rainfall Sequences and Its Application

Akira FUKUSHIMA, Ikuo TAKEDA and Hiroaki SOMURA

Abstract　The purpose of this paper aims to improve the hydrological prediction accuracy of the storaged-based runoff model by introducing the delayed input rainfall sequences.

In this paper, a storaged-based runoff model, in which the LST-Ⅱ model（the Long- and Short - Terms Runoff Model Ⅱ）proposed by Kadoya and Nagai is modified, is developed by including the followings: the estimation method of effective rainfall series forming the surface runoff and/or prompt subsurface runoff, and the lag time of these runoff components in the runoff process of river basin. The outline are as follows:

（1）The observed areal mean rainfall sequence is transformed by the delayed function. The function is evaluated from the distribution characteristics of slope length in a basin model and the equation of lag time applied the practical formula for the concentration time.

（2）By introducing the functional structure of rainwater infiltration in the upper tank of LST-Ⅱ model, the effective rainfall sequence concerned in the surface runoff and/or prompt subsurface runoff is automatically in the proposed model named as the Applied LST-Ⅱ model.

（3）The Applied LST-Ⅱ model is identified by modifying the SP method（Standardized Powell Method）proposed by Kadoya and Nagai.

（4）By a flood runoff analysis using the delayed input rainfall sequence as input data to the Applied LST-Ⅱ model, it is showned that the proposed method is expected to apply as a practical use in the Hii River basin of 911.4km^2 and Otonashi River basin of 0.296km^2.

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

ま え が き

前報[1]では，角屋・永井の提案による長短期流出両用モデル[2]のモデル構造を活用することにより，有効降雨時系列特性が議論できるようにした応用LST-Ⅱモデルを提案し，本流出モデルによる流出解析手法について若干の検討を行った．

本報告では，前報[1]ならびに筆者らの流出解析に関するこれまでの検討結果を踏まえつつ，洪水流出解析あるいは長短期流出解析で常用されている貯留型流出モデルの適用性をさらに向上させることを意図して検討した流出解析手法とその適用事例について述べる．

ところで，貯留関数法，タンクモデルならびに長短期流出両用モデルなどいずれの貯留型流出モデルにおいても，流域特性に応じた流域固有の一定の遅れ時間の導入により，観測ハイドログラフの再現性が向上することが確かめられている．そして，流域面積が大きくなるにつれて遅れ時間も大きくなる傾向があると指摘され，永井は洪水時の遅れ時間 t_L（h）と流域面積 A（km^2）との関係を整理し，t_L の推定式を提案している[3]．しかし，細部的には，t_L は流域面積の他に，出水規模や流域土地利用形態さらに降雨波形特性にも影響を受けることから，貯留型流出モデルに共通な課題としてなお検討の余地があることが言及されている．

そこで，前報[1]で提示した応用LST-Ⅱモデルへの入力降雨として用いる流域平均降雨系列が流域規模，降雨波形特性に応じた流域斜面域及び河道部における雨水伝播特

性ならび流域貯留等による遅延効果を受けるものとして，新たに遅延入力降雨系列を貯留型流出モデルに導入した流出解析手法を考える．すなわち，長短期流出両用モデルを基礎にした流出モデルを用い，特にピーク流量とその発生時刻が観測値と一致するように流出モデルへの入力降雨時系列を工夫した手法を提示するとともに，流域面積の異なる大小２流域における本流出モデルの適用事例を示す．

１．流出モデル

洪水時の直接流出に関与する降雨分，いわゆる有効降雨の実用的推定手法として，角屋・永井の長短期流出両用モデル（LST-Ⅱモデル）[2]を活用した２種の貯留型流出モデルによる手法を考え，貯留型流出モデルにおける有効降雨時系列特性が議論できるようにする．すなわち，貯留型流出モデルにおける直接流出成分への有効降雨系列は，まず流出計算単位時間毎の入力降雨が樹木等による降雨遮断及び地表面窪地貯留の効果を受けた後，さらに長短期流出両用モデルの第１タンク下層部への浸透高を減じて算定することとし，本有効降雨系列を用いた貯留型流出モデルによる流出解析手法を考える．

図－１，２に示す応用LST-Ⅱモデル A，応用LST-Ⅱモデル B の２種の流出モデルを考える．この両モデルとも長短期流出両用モデルの第１タンク下層への浸透能 f，遅い中間流出 Q_3，地下水流出 Q_4，Q_5 を算定するタンクのモデル構造はそのまま利用している．表面流出 Q_1 及び速い中間流出 Q_2 の両流出成分になる降雨分，いわゆる直接流出を形成する有効降雨の算定は，集中定数型 KiWS モデル[4]の場合と同様に以下に示す雨水流モデルの斜面における流れについての連続の式（1），(3）の右辺の表現形式を援用することとする．

（ｉ）表面流：

$$\partial h/\partial t+\partial q/\partial x=r-f_1 \quad \cdots\cdots (1)$$

$$q=\alpha h^m \quad \cdots\cdots (2)$$

ここに，h：水深，q：斜面単位幅当たりの流量，x：斜面に沿って下流向きの距離，t：時間，r：降雨強度，f_1：浸透強度，α，m：定数．

（ⅱ）中間流：

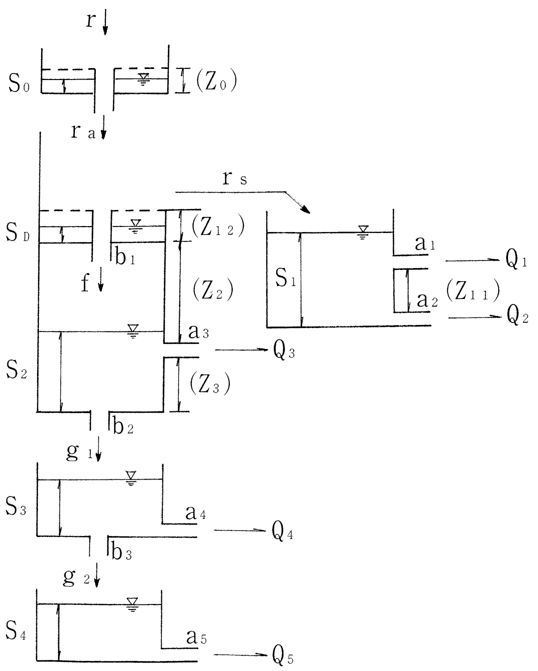
$$\lambda\cdot\partial H/\partial t+\partial q_l/\partial x=f_1-f_2 \quad \cdots\cdots (3)$$

$$q_l=kHI \quad \cdots\cdots (4)$$

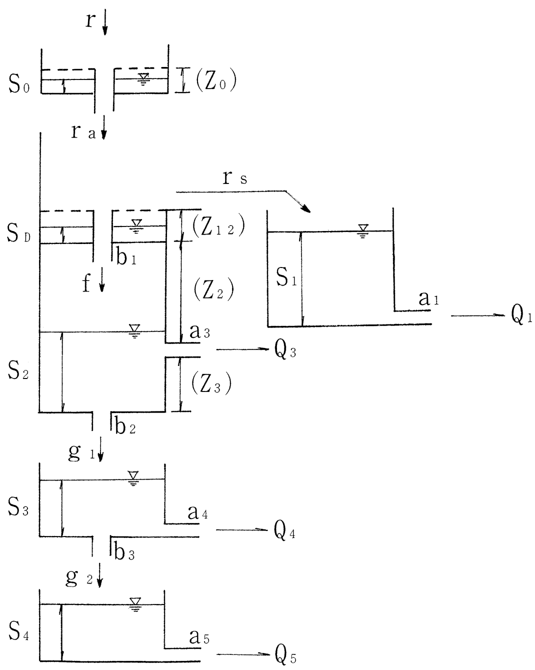
ここに，H：表層（A 層）内の水深，q_l：表層単位幅当たりの流量，x：表層に沿って下流向きの距離，t：時間，λ：表層の有効間隙率，k：表層の透水係数，f_1，f_2：表層および下層の浸透強度，I：動水勾配．

なお，応用LST-Ⅱモデル B は，第１段タンク上層部の流出を表面流出 Q_1 のみで表現した流出モデルである．これにより，本流出モデルでは，貯留関数法と同様な直接流出の扱いをすることになる．

応用LST-Ⅱモデル A，B の基本構造はLST-Ⅱモデルと同じである．したがって，図－1，２に示す各段タンクからの流出高 Q_1～Q_5 はLST-Ⅱモデルと同じ算定式を用いる



図−1　応用LST-Ⅱモデル A



図−2　応用LST-Ⅱモデル B

こととなる．しかし，応用LST-Ⅱモデルでは，後述するように，表面流出高及び速い中間流出高を規定するタンク貯留高S_1の算定法がLST-Ⅱモデルと異なる方式となっている．なお，図－1，2には，降雨遮断量及び地表面窪地貯留量を算定するタンクも付加して表示してある．

以下，図－1に示す応用LST-ⅡモデルAによる降雨遮断量，低水流出高，浸透能，蒸発散量の算定式を示す．

降雨遮断量：

樹木等による降雨遮断量I_iは，角屋・永井の提案によるLST-Ⅱモデル[2)]で採用されている次式の形で算定する．そして，後述の遅延入力降雨系列$r_{m,i}$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．

$$r_{a,i}=3600\{R_i-(I_i-I_{i-1})\}/\varDelta t_r \quad (5)$$

$$I_i=(Z_0-S_{00})\{1-\exp(-R_i/Z_0)\} \quad (6)$$

$$R_i=\Sigma\, r_i\cdot\varDelta t_r/3600 \quad (7)$$

ここに，R_i：遅延入力降雨系列の単位時間を$\varDelta t_r$秒としたとき，$i\varDelta t_r$時刻までの累加雨量（mm），I_i：$i\varDelta t_r$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），$r_{m,i}$：時刻（i−1）$\varDelta t_r$～$i\varDelta t_r$間の遅延入力降雨量（強度）（mm/h），$r_{a,i}$：時刻（i−1）$\varDelta t_r$～$i\varDelta t_r$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：

$$Q_3=a_3(S_2-Z_3)$$

$$=\alpha_*a_3'(S_2-Z_3)\quad(\text{for}\ S_2\geqq Z_3) \quad (8)$$

$$Q_3=0\quad(\text{for}\ S_2<Z_3) \quad (9)$$

$$Q_4=a_4S_3=\alpha_*a_4'S_3 \quad (10)$$

$$Q_5=a_5S_4=\alpha_*a_5'S_4 \quad (11)$$

$$f=b_1(Z_2+Z_3-S_2)$$

$$=\alpha_*b_1'(Z_2+Z_3-S_2) \quad (12)$$

$$g_1=b_2S_2=\alpha_*b_2'S_2 \quad (13)$$

$$g_2=b_3S_3=\alpha_*b_3'S_3 \quad (14)$$

ここに，Q_3～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），a_3～a_5，b_1～b_3：LST-Ⅱモデルで定義されている定数（h^{-1}），$\alpha_*=\alpha_S/B$，B：流域平均斜面長（m），α_S：換算係数で計算単位時間を$\varDelta t_s$秒としたとき，$\alpha_S=\varDelta t_s\times10^{-2}$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．$a_3'$：遅い中間流出を規定する定数（cm/s），$a_4'$，$a_5'$：地下水流出を規定する定数（cm/s），$b_1'$～$b_3'$：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[5)]および角屋・永井の長短期流出両用モデルにおける手法[2)]を利用し，次式の形式で算定する．

$$E_t=E_1+E_2+E_3 \quad (15)$$

$$E_1=E_0-E_c,\quad \text{for}\ S_0>0,\ S_D>0,\ S_1>0\ \text{or}\ S_2\geqq Z_3 \quad (16)$$

$$=S_2(E_0-E_c)/Z_3\quad \text{for}\ S_0=S_D=S_1=0,\ \text{and}\ 0\leqq S_2\leqq Z_3 \quad (17)$$

$$E_2=\tau E_c\quad \text{for}\ S_3>0 \quad (18)$$

$$E_3=(1-\tau)E_c\quad \text{for}\ S_4>0 \quad (19)$$

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．

直接流出高：

$$Q_1=a_1(S_1-Z_{11})^m$$

$$=\alpha_*\{(S_1-Z_{11})/a_1'\}^m,\quad m=5/3\quad(\text{for}\ S_1>Z_{11}) \quad (20)$$

$$Q_2=a_2S_1$$

$$=\alpha_*a_2'S_1\quad(\text{for}\ S_1\leqq Z_{11}) \quad (21)$$

$$Q_2=a_2Z_{11}$$

$$=\alpha_*a_2'Z_{11}\quad(\text{for}\ S_1>Z_{11}) \quad (22)$$

ここに，Q_1，Q_2：直接流出高（mm/h）で，Q_1は表面流出高，Q_2は速い中間流出高（mm/h）を想定する．a_1，a_2：LST-Ⅱモデルで定義の定数，a_1'：表面流モデルの斜面流定数kに相当する定数（$m^{-1/5}s^{3/5}$），a_2'：中間流モデル定数$k_I\cdot s/\lambda$（k_I：表層の透水係数，s：斜面勾配，λ：表層の有効間隙率）に相当する定数（cm/s），Z_{11}：流出孔の高さ（mm）．

また，降雨遮断タンク，直接流出高および低水流出高を算定する各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：

$$dS_0/dt=r_m,\ r_a=0\quad \text{for}\ S_0<Z_0\ \text{and}\ r_m\neq0 \quad (23)$$

$$dS_0/dt=0,\ r_m-r_a=0,\ \text{for}\ S_0=Z_0\ \text{and}\ r_m\neq0 \quad (24)$$

$$dS_0/dt=-E_1',\ \text{for}\ 0<S_0\leqq Z_0\ \text{and}\ r_m=0 \quad (25)$$

$$dS_D/dt=r_a,\ \text{for}\ 0\leqq S_D<Z_{12}\ \text{and}\ r_m\neq0 \quad (26)$$

$$dS_D/dt=0,\ \text{for}\ S_D=Z_{12}\ \text{and}\ r_m\neq0 \quad (27)$$

$$dS_D/dt=-E_1',\ \text{for}\ S_0=0,\ 0\leqq S_D<Z_{12}\ \text{and}\ r_m=0 \quad (28)$$

$$dS_1/dt=r_s-Q_1-Q_2 \quad (29)$$

$$dS_2/dt=f_g-Q_3-g_1-E_1',\ \text{for}\ S_2\geqq Z_3 \quad (30)$$

$$dS_2/dt=f_g-g_1-E_1',\ \text{for}\ S_2<Z_3 \quad (31)$$

$$dS_3/dt=g_1-Q_4-g_2-E_2' \quad (32)$$

$dS_4/dt = g_2 - Q_5 - E_3'$ ……………………………… (33)

ここに，S_0：降雨遮断タンクの貯留量（mm），t：時間（h），r_m：後述の遅延入力降雨強度（mm/h），r_a：降雨遮断効果を受けた後の降雨量（mm/h），r_s：流出高 Q_1，Q_2 を形成する有効降雨（mm/h），S_D：地表面窪地貯留量（mm），S_1〜S_4：直接流出及び低水流出用タンクの貯留量（mm），f_g：第１段タンク上層よりの補給高（mm/h），E_1'〜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}：最大地表面窪地貯留高（mm），Z_3：流出孔の高さ（mm）である．

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

2．流出モデルへの遅延入力降雨系列

タンクモデル，長短期流出両用モデルなどの貯留型流出モデルでは，通常，ティーセン法で算定した計算単位時間毎の流域平均雨量が流出モデルへの入力降雨系列として，流出計算に用いられる．しかし，貯留型流出モデルでは，流域における斜面域及び河道部の雨水伝播過程を極端に集中化したモデル構造となっているため，ピーク流出量付近の波形特性が鈍化し，ピーク流量が過少評価の傾向が指摘されるなど雨水流のモデルならば説明できるはずのいくつかの現象が説明できなくなる欠点を持っている．

そこで，前述の応用 LST-Ⅱモデルにおいても，モデル構造による雨水貯留効果のみでは，出水現象の非線形性と雨水流出の時間遅れを表現するには限界があるため，以下に示す２つの手法を導入し本流出モデルの適用性を検討することとする．

Case 1：流域規模に応じた一様な「遅れ時間 t_L」を与える場合

Case 2：流域面積，流域斜面長特性及び降雨強度等を考慮した遅延効果を導入した場合

まず，上述 Case 1 の手法は，タンクモデル，長短期流出両用モデルの適用に際して，従来常用されている手法である．たとえば，長短期流出両用モデルでは，前述の永井の研究に見られるように，「遅れ時間 t_L」を次式のように解析対象流域の流域面積の関数で表現する試みにより，流出モデルの適用性の向上が図られている．

$t_L = 0.09\sqrt{A}$ ………………………………………… (34)

ここに，t_L：遅れ時間（h），A：流域面積（km^2）．

ここでは，上述 Case 1 の手法を適用する際，まず，流出計算単位時間毎の流域平均雨量をティーセン法で算定する．次いで，(34) 式で算定される「遅れ時間 t_L」の小数部を切り捨てて，ティーセン法で算定した流域平均雨量系列を整数化した遅れ時間だけスライドさせたものを応用 LST-Ⅱモデルへの入力降雨系列に用いることとする．

また，上述の Case 2 の手法では，「遅れ時間 t_L」の効果を評価するにあたり，流域面積のみならず，流域内の斜面長分布特性も考慮し，かつ洪水到達時間に関する研究成果を利用した手法を用い，検討することとする．なお，本手法は，筆者らが長短期流出両用モデルの適用性を検討する過程で導入したものであり，ここで提案する応用 LST-Ⅱモデルにおいても本手法を組み入れた検討を行う．上述の Case 2 の手法の概略を以下に示す．

巨視的観点から雨水の流出過程は斜面域における雨水から流出水への変換過程と河道系における流出水の伝播・変形過程とで表現されるものとする．こうした雨水流出の遅れ過程を応用 LST-Ⅱモデルに取り込むために，次の仮定（a）〜（d）が成立するものとして検討を進める．

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

$$F(B) = \frac{\lambda^n}{\Gamma(n)}\int_0^B \exp(-\lambda B) B^{n-1} dB \quad \cdots\cdots (35)$$

ここに，n：形状母数，$1/\lambda$：尺度母数．

(b) 洪水到達時間に関する角屋らの研究成果[6]を利用し，最遠斜面から斜面最下流端部までの雨水伝播時間 t_{ms}，及び河道最上流端から河道最下流地点までの雨水流伝播時間 t_{mc} が，次式のように表現できるものとする．

$t_{ms} = C_S \cdot A^{0.24} \cdot r^{-0.40}$ ………………………………… (36)

$t_{mc} = C_C \cdot A^{0.30} \cdot r^{-0.30}$ ………………………………… (37)

ここに，C_S，C_C：定数，A：流域面積（km^2），r：降雨強度（mm/h）．

（c）河道から斜面に沿い距離 B_0 の斜面長と斜面域の雨水擾乱の伝播時間が１対１で対応するものとする．いま，河道から斜面に沿い距離 B_0 をとったとき，そこに含まれる斜面面積の流域面積に対する比率 $P(B_0)$ を求める．ここで，斜面長 B_0 と $P(B_0)$ との関係を図示したものを集中斜面長図と呼ぶことにする．なお，実際の流出計算に応用するに際し，(38) 式で表される形状母数 n，尺度母数 $1/\lambda = 1$ とするガンマ分布の確率密度関数 $f_Y(y)$ を利用して，$P(B_0)$ に対応する $W(y)$ の値を（39）式により算定しておく．

$$f_Y(y) = \frac{1}{\Gamma(n)} \exp(-y) y^{n-1} \quad \cdots\cdots (38)$$

$$W(y)=\frac{1}{\Gamma(n)}\int_0^{y_0}\exp(-y)y^{n-1}dy$$

$$+\sum_j \frac{y_0}{y_j\Gamma(n)}\int_{y_j}^{y_{j+1}}\exp(-y)y^{n-1}dy \quad \cdots (39)$$

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

(d) 河道部における雨水擾乱の伝播時間の確率分布は，ガンマ分布で近似されるものとする．

以上の仮定のもとに，ティーセン法で算定した流出計算単位時間毎の流域平均雨量系列を，以下のようにして遅延入力降雨系列に変換する．

いま，入力降雨単位時間を $\varDelta t$ とし，時刻 t_{i-1}〜t_i 間の降雨強度を r_i とする．この r_i は，集中斜面長分布に対応した確率分布を有する遅れ時間の効果を受けて，河道に到達するものとする．すなわち，r_i を，雨水擾乱の集中時間を考慮した遅延作用素（重み関数）により，次式のような降雨系列 $r_n(j\cdot\varDelta t)_i$ に変換する．

$$r_n(j\cdot\varDelta t)_i=r_i\cdot\varDelta W(t_s) \quad \cdots\cdots (40)$$

ここに，$i=1, 2, \cdots\cdots N$．$j=i, i+1, \cdots\cdots, i+n_s-1$．$n_s=t_{ms}/\varDelta t$．$\varDelta W(t_s)=W(y_s)-W(y_{s-1})$．$y_s=\alpha\cdot t_s$，$\alpha=Z_B/t_{ms}$，$t_s=s\cdot\varDelta t$，$(s=1, 2, \cdots\cdots n_s)$．

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

$$r_c(n\cdot\varDelta t)_{i,j}=r_n(j\cdot\varDelta t)_i\cdot\varDelta Y(t_k) \quad \cdots\cdots (41)$$

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

以上のようにして，解析対象流域における流域平均雨量系列 r_i，$(i=1, 2, \cdots\cdots, N)$ は，上述の手順を経て得られる降雨系列 $r_c(n\cdot\varDelta t)_{i,j}$ のうち，$n=i$ となる $r_c(n\cdot\varDelta t)_{i,j}$ を集計することによって，本流出モデルに入力すべき遅延降雨系列 $r_m(l\cdot\varDelta t)$ に変換される．ここに，$l=1, 2, \cdots\cdots, N+n_s+n_{k-1}$．

3．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隣りあった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．

いま，図−1，2に示す応用 LST-Ⅱモデル A，B 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高は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 との相対的関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．

前述のように，応用 LST-Ⅱモデル A，B ともに，降雨終了とともに第1段タンク下層部への補給高 f_g は0になるモデル構造としているため，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．またステージ3，4では，浸透能 f に見合う降雨が補給されるか否かにより，それぞれ2つの形式が考えられる．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．

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/h）	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/h）
1	1	$Z_3\leqq S_2\leqq S_{2u}$	$Q_3\neq 0$	$f_g=0$	$E_t\neq 0$
2	2	$0\leqq S_2\leqq Z_3$	$Q_3=0$	$f_g=0$	$E_t\neq 0$
3	3−Ⅰ	$0\leqq S_2\leqq Z_3$	$Q_3=0$	$f_g=f$	$E_t=0$
4	3−Ⅱ	$0\leqq S_2\leqq Z_3$	$Q_3=0$	$f_g=f_0$	$E_t=0$
5	4−Ⅰ	$Z_3\leqq S_2\leqq S_{2u}$	$Q_3\neq 0$	$f_g=f$	$E_t=0$
6	4−Ⅱ	$Z_3\leqq S_2\leqq S_{2u}$	$Q_3\neq 0$	$f_g=f_0$	$E_t=0$
7	5	$S_2=S_{2u}$	$Q_3\neq 0$	$f_g=f_c$	$E_t=0$

4．流出解析手順

前項 **2.** で算定される遅延入力降雨系列は応用LST-Ⅱモデルのモデル構造を介して，直接流出及び間接流出に関わる両成分に分離された後，各段タンクによる貯留効果を受けながら，表面流出，速い中間流出，遅い中間流出及び地下水流出の各流出成分が形成されるものとする．本流出モデルによる有効降雨，流出高の算定手順及び各段タンク貯留量の算定式は以下のとおりである．

有効降雨の算定：

図－1に示す応用LST-Ⅱモデル A における表面流出高 Q_1 及び速い中間流出高 Q_2 に関わる降雨分，すなわち直接流出高を形成する有効降雨は，集中定数型KiWSモデルにおける有効降雨算定手法[4]を適用して算定する．その概略を示すと以下のような手順となる．

（ⅰ）まず，入力降雨 r を前述の手法により遅延入力降雨系列 r_m に変換する．(ii) r_m を（5）～（7）式で算定される降雨遮断効果を受けた後の降雨量 r_a に変換する．(iii) 地表面の窪地貯留量 S_D を求めた後，r_a から S_D の増分を差し引き，残りの降雨量を r_e とする．そして流出高 Q_1，Q_2 を形成する有効降雨 r_s は，$r_s = r_e - f_g$ として算定される．この場合，第1段目タンク上層部よりの補給高 f_g は，(a) 計算単位時間 Δt_s 内に浸透能 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，(b) 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，表面流出高及び速い中間流出高を形成する，いわゆる有効降雨系列 r_s は，上述のタンク貯留量 S_0，S_D，S_2～S_4 及び低水流出高 Q_3～Q_5 等の計算過程と平行して算定されることとなる．

なお，図－2の応用LST-Ⅱモデルにおいて，定数 a_1，a_2 はLST-Ⅱモデルで定義されている定数を示すが，式（20）に示す a_1' は表面流モデルの斜面流定数 k に相当する定数（$m^{-1/5}s^{3/5}$）であり，式（21）（22）の a_2' は中間流モデル定数 $k_I \cdot s/\lambda$ に相当する定数（cm/s）として定義している．

また，応用LST-Ⅱモデルでは，浸透能 f の算定はLST-Ⅱモデルと同じく（12）式を用いるが，第1段下層タンクへの補給高 f_g の算定過程で以下のようにLST-Ⅱモデルと異なった処理が行うことになる．

LST-Ⅱモデルによる補給高 f_g：

　浸透能 f に見合うだけの貯留量 S_1 がある場合，

　補給高 $f_g = f$

応用LST-Ⅱモデルによる補給高 f_g：

　浸透能 f に見合うだけの入力降雨 r_e がある場合，

　補給高 $f_g = f$

また，LST-Ⅱモデルでは，降雨が終了しても第1段タンク上層部に貯留量がある限り，下層部への補給が継続する手法であるのに対し，応用LST-Ⅱモデルでは，降雨終了とともに，第1段タンク下層部への補給高 f_g は0になる流出モデル構造としている．

流出高の算定手順：

ｉ）まず，上述 **2.** で算定した計算単位時間毎の遅延入力降雨量 r_m から降雨降雨遮断量を差し引く．ここで，降雨遮断量は（5）～（7）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 から地表面窪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_D の上限値を Z_{12} とし，降雨量 r_a は，S_D が Z_{12} に達するまで地表面窪地貯留量の増加量となり，$S_D = Z_{12}$ 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，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 $r_s = r_e - \bar{f}$，$r_e < \bar{f}$ 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，（12）式及び低水流出のステージ3,4,5に応じたタンク貯留量の関係から算定される．ただし，S_2 は，時刻 t～t＋Δt_s 間の平均貯留量の値を用いる．

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 $f_g = \bar{f}$，すなわち $r_e > \bar{f}$ のとき，f_g は Δt_s 時間内で一定値 $\bar{f}$ とするのではなく，S_2 の時間的変化曲線を（12）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 $f_g = f_0 = r_e$ で与えられる．

vi）時刻 t の貯留量 S_2～S_4 を既知とし，Δt_s 時間後の貯留量 S_2～S_4 を算定する．その際，上述ｉ）～ｖ）の過程における低水流出高への補給高 f_g の算定手法，及び（30）～（33），（8）～（19）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応用LST-Ⅱモデルの低水流出部タンクの貯留量 S_2～S_4 に関する常微分方程式が得られ，貯留量 S_2～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 $S_2(t)$～$S_4(t)$ を既知とした

とき，計算単位時間$\varDelta t_s$時間後の時刻$t+\varDelta t_s$における貯留量$S_2(t+\varDelta t_s)$～$S_4(t+\varDelta t_s)$及び時刻t～$t+\varDelta t_s$間の平均貯留量$\bar{S}_2(t+\varDelta t_s)$～$\bar{S}_4(t+\varDelta t_s)$を各ステージに応じて算定する．

ⅶ）上述ⅵ）により，時刻tにおける貯留量$S_2(t)$～$S_4(t)$を既知としたとき，計算単位時間$\varDelta t_s$時間後の時刻$t+\varDelta t_s$における貯留量$S_2(t+\varDelta t_s)$～$S_4(t+\varDelta t_s)$の値を算定することにより，これらの値を（8）～（11）式に代入し，時刻$t+\varDelta t_s$における流出サイクルの各ステージに応じた低水流出高$Q_B=\Sigma Q_i$（$i=3,4,5$）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）表面流出高Q_1，速い中間流出高Q_2の和として評価される直接流出高Q_Dを算定する．その際，これら，表面流出高Q_1，速い中間流出高Q_2を規定するタンク貯留高S_1への入力降雨系列r_sは，前述のⅰ）～ⅴ）の過程から算定されるr_eとf_gの差として評価される降雨系列とする．そして，（29）式で与えられる連続条件のもとで，表面流出高Q_1及び速い中間流出高Q_2を（20）～（22）式から算定する．

ⅹ）前述ⅶ）及びⅸ）で算定した低水流出高Q_B，直接流出高Q_Dの和から，計算単位時間毎の流域下流端における流出高系列Q（mm/h）を算定する．また，観測流量時系列との比較を考慮し，この流出高系列Q（mm/h）を次式により流量時系列Q'（m^3/s）にも変換しておく．

$$Q'=Q\cdot A/3.6 \tag{42}$$

ここに，A：流域面積（km^2）

上述ⅰ）～ⅹ）の流出解析手順をフローチャートで示すと，図−3のようになる．なお，応用LST−Ⅱモデル Bの場合，流出高Q_2の算定は不要である．

貯留量の算定式：

時刻tにおける$S_2(t)$～$S_4(t)$を既知としたとき，計算単位時間$\varDelta t_s$時間後の時刻$t+\varDelta t_s$における貯留量$S_2(t+\varDelta t_s)$～$S_4(t+\varDelta t_s)$及び時刻t～$t+\varDelta t_s$間の平均貯留量$\bar{S}_2(t+\varDelta t_s)$～$\bar{S}_4(t+\varDelta t_s)$は，各ステージに応じた以下の式で算定する．

ⅰ）ステージ1（$Z_3\leqq S_2\leqq S_{2u}$，$f_g=0$，$E_t\neq 0$）

$$S_2(t+\varDelta t_s)=J_0\exp(-\lambda_0\varDelta t_s)+\zeta_0 \tag{43}$$

$$S_3(t+\varDelta t_s)=J_1\exp(-\lambda_0\varDelta t_s)+J_2\exp(-\lambda_2\varDelta t_s)+J_3 \tag{44}$$

$$S_4(t+\varDelta t_s)=J_4\exp(-\lambda_0\varDelta t_s)+J_5\exp(-\lambda_2\varDelta t_s)+J_6\exp(-\lambda_3\varDelta t_s)+J_7 \tag{45}$$

$$\bar{S}_2(t+\varDelta t_s)=J_0[\{1-\exp(-\lambda_0\varDelta t_s)\}/(\lambda_0\varDelta t_s)]+\zeta_0 \tag{46}$$

$$\bar{S}_3(t+\varDelta t_s)=J_1[\{1-\exp(-\lambda_0\varDelta t_s)\}/(\lambda_0\varDelta t_s)]+J_2[\{1-\exp(-\lambda_2\varDelta t_s)\}/(\lambda_2\varDelta t_s)]+J_3 \tag{47}$$

$$\bar{S}_4(t+\varDelta t_s)=J_4[\{1-\exp(-\lambda_0\varDelta t_s)\}/(\lambda_0\varDelta t_s)]+J_5[\{1-\exp(-\lambda_2\varDelta t_s)\}/(\lambda_2\varDelta t_s)]+J_6[\{1-\exp(-\lambda_3\varDelta t_s)\}/(\lambda_3\varDelta t_s)]+J_7 \tag{48}$$

ⅱ）ステージ2（$0\leqq S_2\leqq Z_3$，$f_g=0$，$E_t\neq 0$）

$$S_2(t+\varDelta t_s)=S_2(t)\exp(-\lambda_1\varDelta t_s) \tag{49}$$

$$S_3(t+\varDelta t_s)=J_8\exp(-\lambda_1\varDelta t_s)+J_9\exp(-\lambda_2\varDelta t_s)-\zeta_3 \tag{50}$$

$$S_4(t+\varDelta t_s)=J_{10}\exp(-\lambda_1\varDelta t_s)+J_{11}\exp(-\lambda_2\varDelta t_s)+J_{12}\exp(-\lambda_3\varDelta t_s)+J_{13} \tag{51}$$

$$\bar{S}_2(t+\varDelta t_s)=S_2(t)[\{1-\exp(-\lambda_1\varDelta t_s)\}/(\lambda_1\varDelta t_s)] \tag{52}$$

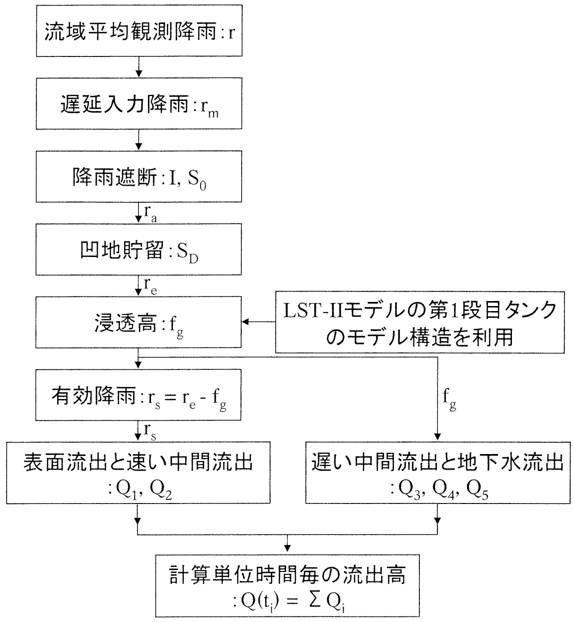
$$\bar{S}_3(t+\varDelta t_s)=J_8[\{1-\exp(-\lambda_1\varDelta t_s)\}/(\lambda_1\varDelta t_s)]+J_9[\{1-\exp(-\lambda_2\varDelta t_s)\}/(\lambda_2\varDelta t_s)]-\zeta_3 \tag{53}$$

$$\bar{S}_4(t+\varDelta t_s)=J_{10}[\{1-\exp(-\lambda_1\varDelta t_s)\}/(\lambda_1\varDelta t_s)]+J_{11}[\{1-\exp(-\lambda_2\varDelta t_s)\}/(\lambda_2\varDelta t_s)]+J_{12}[\{1-\exp(-\lambda_3\varDelta t_s)\}/(\lambda_3\varDelta t_s)]+J_{13} \tag{54}$$

ⅲ）ステージ3−I（$0\leqq S_2\leqq Z_3$，$f_g=f$，$E_t=0$）

$$S_2(t+\varDelta t_s)=J_{14}\exp(-\lambda_4\varDelta t_s)+\zeta_{10} \tag{55}$$

$$S_3(t+\varDelta t_s)=J_{15}\exp(-\lambda_4\varDelta t_s)$$



図−3 応用LST-Ⅱモデル A(B)による流出計算フローチャート

$+J_{16}\exp(-\lambda_2\,\varDelta t_s)+J_{17}$ ……………………… (56)

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

$+J_{19}\exp(-\lambda_2\,\varDelta t_s)+J_{20}\exp(-\lambda_3\,\varDelta t_s)+J_{21}$

……… (57)

$\bar{S}_2(t+\varDelta t_s)=J_{14}[\{1-\exp(-\lambda_4\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_4\,\varDelta t_s)]+\zeta_{10}$ ……………………… (58)

$\bar{S}_3(t+\varDelta t_s)=J_{15}[\{1-\exp(-\lambda_4\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_4\,\varDelta t_s)]+J_{16}[\{1-\exp(-\lambda_2\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_2\,\varDelta t_s)]+J_{17}$ ……………………… (59)

$\bar{S}_4(t+\varDelta t_s)=J_{18}[\{1-\exp(-\lambda_4\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_4\,\varDelta t_s)]+J_{19}[\{1-\exp(-\lambda_2\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_2\,\varDelta t_s)]+J_{20}[\{1-\exp(-\lambda_3\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_3\,\varDelta t_s)]+J_{21}$ ……………………… (60)

iv）ステージ3－Ⅱ（$0\leqq S_2\leqq Z_3$，$f_g=f_0$，$E_t=0$）

$S_2(t+\varDelta t_s)=J_{22}\exp(-\lambda_5\,\varDelta t_s)+J_{23}$ ……………… (61)

$S_3(t+\varDelta t_s)=J_{24}\exp(-\lambda_5\,\varDelta t_s)$

$+J_{25}\exp(-\lambda_2\,\varDelta t_s)+J_{26}$ ……………………… (62)

$S_4(t+\varDelta t_s)=J_{27}\exp(-\lambda_5\,\varDelta t_s)$

$+J_{28}\exp(-\lambda_2\,\varDelta t_s)$

$+J_{29}\exp(-\lambda_3\,\varDelta t_s)+J_{30}$ ……………………… (63)

$\bar{S}_2(t+\varDelta t_s)=J_{22}[\{1-\exp(-\lambda_5\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_5\,\varDelta t_s)]+J_{23}$ ……………………… (64)

$\bar{S}_3(t+\varDelta t_s)=J_{24}\{1-\exp(-\lambda_5\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_5\,\varDelta t_s)]+J_{25}[\{1-\exp(-\lambda_2\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_2\,\varDelta t_s)]+J_{26}$ ……………………… (65)

$\bar{S}_4(t+\varDelta t_s)=J_{27}[\{1-\exp(-\lambda_5\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_5\,\varDelta t_s)]+J_{28}[\{1-\exp(-\lambda_2\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_2\,\varDelta t_s)]+J_{29}[\{1-\exp(-\lambda_3\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_3\,\varDelta t_s)]+J_{30}$ ……………………… (66)

v）ステージ4－Ⅰ（$Z_3\leqq S_2\leqq S_{2u}$，$f_g=f$，$E_t=0$）

$S_2(t+\varDelta t_s)=J_{31}\exp(-\lambda_6\,\varDelta t_s)+S_{2u}$ ……………… (67)

$S_3(t+\varDelta t_s)=J_{32}\exp(-\lambda_6\,\varDelta t_s)$

$+J_{33}\exp(-\lambda_2\,\varDelta t_s)+J_{34}$ ……………………… (68)

$S_4(t+\varDelta t_s)=J_{35}\exp(-\lambda_6\,\varDelta t_s)$

$+J_{36}\exp(-\lambda_2\,\varDelta t_s)$

$+J_{37}\exp(-\lambda_3\,\varDelta t_s)+J_{38}$ ……………………… (69)

$\bar{S}_2(t+\varDelta t_s)=J_{31}[\{1-\exp(-\lambda_6\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_6\,\varDelta t_s)]+S_{2u}$ ……………………… (70)

$\bar{S}_3(t+\varDelta t_s)=J_{32}[\{1-\exp(-\lambda_6\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_6\,\varDelta t_s)]+J_{33}[\{1-\exp(-\lambda_2\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_2\,\varDelta t_s)]+J_{34}$ ……………………… (71)

$\bar{S}_4(t+\varDelta t_s)=J_{35}[\{1-\exp(-\lambda_6\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_6\,\varDelta t_s)]+J_{36}[\{1-\exp(-\lambda_2\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_2\,\varDelta t_s)]$

$+J_{37}[\{1-\exp(-\lambda_3\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_3\,\varDelta t_s)]+J_{38}$ ……………………… (72)

vi）ステージ4－Ⅱ（$Z_3\leqq S_2\leqq S_{2u}$，$f_g=f_0$，$E_t=0$）

$S_2(t+\varDelta t_s)=J_{39}\exp(-\lambda_0\,\varDelta t_s)+J_{40}$ ……………… (73)

$S_3(t+\varDelta t_s)=J_{41}\exp(-\lambda_0\,\varDelta t_s)$

$+J_{42}\exp(-\lambda_2\,\varDelta t_s)+J_{43}$ ……………………… (74)

$S_4(t+\varDelta t_s)=J_{44}\exp(-\lambda_0\,\varDelta t_s)$

$+J_{45}\exp(-\lambda_2\,\varDelta t_s)$

$+J_{46}\exp(-\lambda_3\,\varDelta t_s)+J_{47}$ ……………………… (75)

$\bar{S}_2(t+\varDelta t_s)=J_{39}[\{1-\exp(-\lambda_0\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_0\,\varDelta t_s)]+J_{40}$ ……………………… (76)

$\bar{S}_3(t+\varDelta t_s)=J_{41}[\{1-\exp(-\lambda_0\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_0\,\varDelta t_s)]+J_{42}[\{1-\exp(-\lambda_2\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_2\,\varDelta t_s)]+J_{43}$ ……………………… (77)

$\bar{S}_4(t+\varDelta t_s)=J_{44}[\{1-\exp(-\lambda_0\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_0\,\varDelta t_s)]+J_{45}[\{1-\exp(-\lambda_2\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_2\,\varDelta t_s)]+J_{46}[\{1-\exp(-\lambda_3\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_3\,\varDelta t_s)]+J_{47}$ ……………………… (78)

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

$S_2(t+\varDelta t_s)=S_{2u}$ ……………………… (79)

$S_3(t+\varDelta t_s)=J_{48}\exp(-\lambda_2\,\varDelta t_s)+J_{34}$ ……………… (80)

$S_4(t+\varDelta t_s)=J_{49}\exp(-\lambda_2\,\varDelta t_s)$

$+J_{50}\exp(-\lambda_3\,\varDelta t_s)+J_{38}$ ……………………… (81)

$\bar{S}_2(t+\varDelta t_s)=S_{2u}$ ……………………… (82)

$\bar{S}_3(t+\varDelta t_s)=J_{48}[\{1-\exp(-\lambda_2\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_2\,\varDelta t_s)]+J_{34}$ ……………………… (83)

$\bar{S}_4(t+\varDelta t_s)=J_{49}[\{1-\exp(-\lambda_2\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_2\,\varDelta t_s)]+J_{50}[\{1-\exp(-\lambda_3\,\varDelta t_s)\}$

$/(\lambda_3\,\varDelta t_s)]+J_{38}$ ……………………… (84)

ここに，$\lambda_0=\alpha_*(a_3'+b_2')$，

$\lambda_1=\alpha_* b_2'+(E_0-E_c)/Z_3$，$\lambda_2=\alpha_*(a_4'+b_3')$，

$\lambda_3=\alpha_* a_5'$，$\lambda_4=\alpha_*(b_1'+b_2')$，$\lambda_5=\alpha_* b_2'$，

$\lambda_6=\alpha_*(a_3'+b_1'+b_2')$，

$\zeta_0=(\alpha_* a_3' Z_3-E_0+E_c)/\lambda_0$

$\zeta_1=\alpha_* b_2'/(\lambda_0-\lambda_2)$，$\zeta_2=\alpha_* b_2'/\lambda_2$，

$\zeta_3=\gamma_1 E_c/\lambda_2$，$\zeta_4=\alpha_* b_3'/(\lambda_0-\lambda_3)$，

$\zeta_5=\alpha_* b_3'/(\lambda_2-\lambda_3)$，$\zeta_6=\alpha_* b_3'/\lambda_3$，

$\zeta_7=(1-\gamma_1)E_c/\lambda_3$，$\zeta_8=\alpha_* b_2'/(\lambda_1-\lambda_2)$，$\zeta_9=\alpha_* b_3'/(\lambda_1-\lambda_3)$，

$\zeta_{10}=\alpha_* b_1'(Z_2+Z_3)/\lambda_4$，

$\zeta_{11}=\alpha_* b_2'/(\lambda_4-\lambda_2)$，$\zeta_{12}=\alpha_* b_3'/(\lambda_4-\lambda_3)$，

$\zeta_{13}=\alpha_* b_2'/(\lambda_5-\lambda_2)$，$\zeta_{14}=\alpha_* b_3'/(\lambda_5-\lambda_3)$，

$\zeta_{15}=\alpha_* b_2'/(\lambda_6-\lambda_2)$，$\zeta_{16}=\alpha_* b_3'/(\lambda_6-\lambda_3)$，

$\zeta_{17}=\alpha_* a_3' Z_3$，$J_0=S_2(t)-\zeta_0$，$J_1=-\zeta_1 J_0$，

$J_2=S_3(t)-J_1-J_3$，$J_3=\zeta_2\zeta_0-\zeta_3$，$J_4=\zeta_1\zeta_4 J_0$，

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

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．

$$S_{2u}=\{b_1'(Z_2+Z_3)+a_3'Z_3\}/(a_3'+b_1'+b_2') \quad \cdots\cdots (85)$$

$$f_c=\alpha_*\{b_1'b_2'(Z_2+Z_3)+a_3'b_1'Z_2\}/(a_3'+b_1'+b_2') \quad \cdots\cdots (86)$$

5．適用事例

流域規模の異なる2流域における出水を対象に，前述 **2**．の遅延入力降雨系列の算定法のうち Case 2の手法を用いた応用LST-ⅡモデルＡの適用事例を図−4，5に示す．図−4の斐伊川流域（大津地点，A＝911.4km^2）では，ガンマ分布の形状母数 n＝3，(36)，(37) 式の係数 C_s＝600，C_c＝15とした解析例であり，図−5の農地造成域（音無川，A＝0.2963km^2）では n＝8，C_s＝800，C_c＝50とした解析例である．なお，入力降雨の単位時間及び計算単位時間は，斐伊川流域，農地造成域それぞれ，3600秒，600秒とした．斐伊川流域および農地造成域の両流域における観測流出量ハイドログラフは，相対誤差でそれぞれ13%，25%で再現されており，かつ計算ピーク流量及びその発生時刻も観測値と一致した良好な結果が得られている．また，図−4，5の最上段部はハイエトグラフであり，上側が流域平均雨量のハイエトグラフ，下側に遅延入力降雨系列のハイエトグラフが併示してある．

なお，図−4，5の両流域の計算流出量ハイドログラフは，表−2の第3，5欄に示す流出モデル定数による算定結果である．同表第2，4欄には，前述 **2**. の遅延入力降雨系列の算定法として，Case 1を用いた両流域における流出モデルの同定結果も併示してある．なお，流出モデル定数は，集中定数型 KiWS モデルで定義されている単位で示してある．

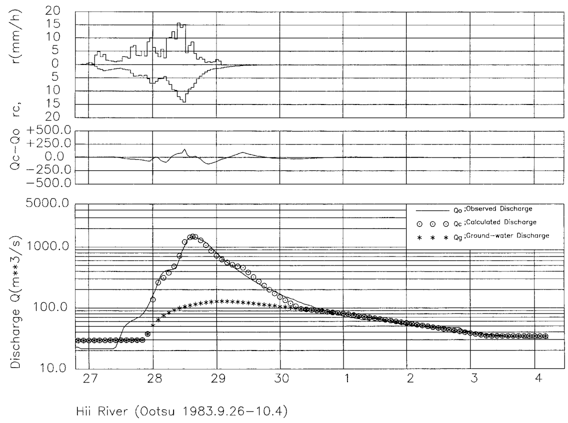
農地造成域の解析結果から，遅延入力降雨系列の算定法として，Case 1よりも，Case 2を適用して解析した方が，観測流出量ハイドログラフの再現性が良好な結果となっている．

しかし，農地造成域の解析例は断続的に連続する複峰型の出水を対象としているものの，斐伊川流域の解析結果と比較すると，なお改良の余地があるといえる．とくに，遅延入力降雨系列の算定に用いた (36)，(37) 式の定数 C_s 及び C_c の値及び流域斜面長分布をガンマ分布で近似する際の形状母数 n の評価値について，今後なお検討が必要と思われる．

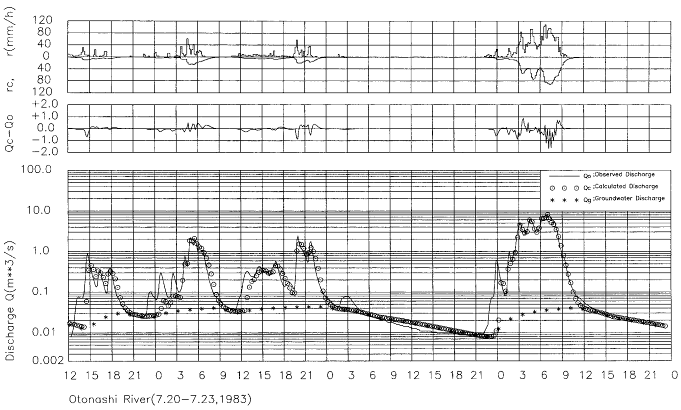
あ と が き

前報[1]の応用 LST-Ⅱモデルに，流域斜面部の斜面長分布特性，および斜面部と河道部における雨水伝播時間を降雨強度と流域面積の関数で近似した遅延効果を導入した新たな応用 LST-Ⅱモデルによる流出解析法を提示し，その適用事例から貯留型流出モデルにおける従来の遅れ時間の扱いが若干改良されたものと思う．

また，本報の応用 LST-Ⅱモデルでは，流出計算単位時間毎に表面流出及び速い中間流出を形成する有効降雨系列の算定が可能であることから，今後，洪水時を対象とした短期流出のみならず，長期流出を対象とした解析を行うことにより，河川流域における降雨情報から，表面流出ならびに速い中間流出を形成する降雨分，すなわち有効降雨に関する長期的な時系列特性についての議論が展開可能と期待している．さらに，本流出モデルでは洪水時の直接流出及び低水流出の両流出成分が独立して計算できるという特徴を有していることを活かし，流域内の時空間的降雨分布特性を反映しうる貯留分布型流出モデルへ拡張した流出解析手法の検討も可能と考えている．



図−4　応用 LST-Ⅱモデル A の適用例（斐伊川流域，大津地点）



図−5　応用 LST-Ⅱモデル A の適用例（農地造成域，音無川流域）

表−2　応用 LST-Ⅱモデル A のモデル定数

モデル定数	斐伊川流域(大津地点)		農地造成域(音無川流域)	
	Case 1 (t_L=3h)	Case 2 (Cs=600, Cc=15)	Case 1 (t_L=40min)	Case 2 (Cs=800, Cc=50)
a_1' ($m^{-1/5}\cdot s^{3/5}$)	0.82	0.62	0.81	0.38
a_2' (cm/s)	9.2	31	0.025	0.040
a_3' (cm/s)	9.1	2.1	0.025	0.035
a_4' (cm/s)	0.75	0.32	0.006	0.003
a_5' (cm/s)	0.026	0.037	0.0002	0.0001
b_1' (cm/s)	13.4	17	0.46	0.16
b_2' (cm/s)	13.3	2.1	0.21	0.063
b_3' (cm/s)	3.7	2.1	0.05	0.019
Z_{11} (mm)	1	13	2	3
Z_{12} (mm)	0	0	8	2
Z_2 (mm)	80	80	80	80
Z_3 (mm)	20	20	20	20
J_{xs} (mm/h)	0.007	0.015	2.7	0.33
J_{re} (%)	9	13	46	25
t_{pc}	15:00	15:00	7:00	7:00
t_{po}	15:00	15:00	7:00	7:00
Q_{pc} (m^3/s)	1658	1487	8.55	8.23
Q_{po} (m^3/s)	1481	1481	8.17	8.17
B (m)	10,540	10,540	138	138

引 用 文 献

1）福島　晟・武田育郎：長短期流出両用モデルを活用した貯留型流出モデル，島根大学生物資源科学部研究報告，9，pp.33-39（2004）

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）永井明博：長短期流出両用モデルの標準的定数について，農業土木学会論文集，180，pp.59-64（1995）

4）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）

5）石原安雄・小葉竹重機：荒川流域試験地における水収支について，京都大学防災研究所年報，14（B），pp.131-141（1971）

6）角屋　睦・福島　晟：中小河川の洪水到達時間，京都大学防災研究所年報，19（B-2），pp.143-152　（1976）