

## 長短期流出両用モデルを活用した貯留型流出モデル

福島 晟, 武田育郎

### A Storage-based Runoff Model applying the Long and Short Terms Runoff Model

Akira FUKUSHIMA, Ikuo TAKEDA

**Abstract** This paper proposes a runoff model which is developed to deal and cope with some problems unsolved for the estimation method of effective rainfall series in the flood runoff analysis. The outline is as follows:

(1) The runoff model is a storage-based type one named an Applied LST- II . It modifies the LST- II model ( the Long and Short Terms Runoff Model ) proposed by Kadoya and Nagai.

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

(3) A runoff cycle of base flow is divided in five stages. The first stage and second stage are related to rainless periods. The recharge to base flow occurs during other stages. The runoff heights of base flow for each stages are derived from the differential equations.

(4) A procedure of runoff analysis is described to direct and low water runoff components. The model has 16 parameters. They are identified by modifying the SP method ( Standardized Powell method ) proposed by Kadoya and Nagai.

(5) It is shown that the Applied LST- II model is expected to apply as a practical use through application in the Hii River basin of 911 4 km<sup>2</sup>. And it is estimated to be applicable as the distributed runoff model to the runoff analysis reflecting the effect of a spatially distribution characteristics of storm rainfall in a watershed.

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

## まえがき

今日, 利水開発や水管理, 水環境保全等の水循環系の諸問題, あるいは健全な水循環系構築に対応するためには, 流域全体を視野に入れた効果的, 効率的な施策を講じることが従来にまして重要である旨が指摘されている。その際, 流域における水循環系は, 流域の自然条件, 社会経済活動の状況, 水に関する歴史的背景等により, 流域ごとに異なることから, 水文学的な諸課題に関しても流域ごとの特性に応じた多面的な検討が必要となってくる。そして, 水文流出解析は, 計算機を利用した水文モデルの開発や 1980 年代後半から急速に発達してきた地理情報システム (GIS) の活用により, 水循環系のみならず, 流域における物質循環系も取り込んだ総合的な検討

段階, あるいは解析モデルのソフトウェアに関する研究・開発状況やその適用性等の情報と共有するための議論が活発に行われつつある時代となっている。

こうした流域規模の水循環に関わる洪水流出ならびに長期流出を同時に扱う代表的流出モデルとして, 角屋・永井の開発・改良研究による長短期流出両用モデル (LST- II モデル) が提案<sup>1)</sup>され, 現在では, ダム貯水池の洪水流出ならびに低水流出の実時間予測法<sup>2)</sup>として活用されている。

本報告では, 洪水時の直接流出に關与する降雨分 (有効降雨) の推定過程で, LST- II モデルのモデル構造を活用した算定法を導入し, 有効降雨時系列特性が議論できるようにした応用 LST- II モデルによる流出解析手法を提案し, 本流出モデルによる洪水流出解析事例を示す。すなわち, LST- II モデルによる有効降雨の自動的推定手法

を若干変更し，表面流出及び速い中間流出に關与する降雨分，いわゆる有効降雨の時系列を流出計算単位時間毎の入力降雨と LST-II モデルの第 1 タンク下層部への浸透高との差により算定する手法を提示するとともに，本解析手法の適用性を斐伊川流域で検討した結果を述べる．

1. 長短期流出両用モデル (LST-II モデル)<sup>1)</sup>

河川流域における洪水出現象を扱う場合，洪水時の有効降雨の合理的推定が重要な課題となるが，貯留型流出モデルに分類される LST-II モデルでは，図 - 1 に示すモデル構造により，有効降雨を自動的に推定し，かつ洪水と低水を同時に連続して解析できる手法が構築されている．したがって，洪水流出解析の代表的な流出モデルとして多用されている雨水流モデルのように，流域保留量曲線を介して計算単位時間毎の有効降雨を算定するという手順は本流出モデルでは不要であり，洪水流出解析における有効降雨問題を解決した流出解析法として，またダム貯水池の実時間洪水予測法として実用に供されている．なお，LST-II モデルの標準的モデル定数として，永井の研究成果に取り纏められており，また，永井はダム貯水池流域を対象とした大流域においては，洪水時の遅れ時間と流域面積には次式のような関係があることを示している<sup>3)</sup>．

$$t_L = 0.09\sqrt{A} \dots\dots\dots (1)$$

ここに， $t_L$ ：遅れ時間 (h)， $A$ ：流域面積 (km<sup>2</sup>)

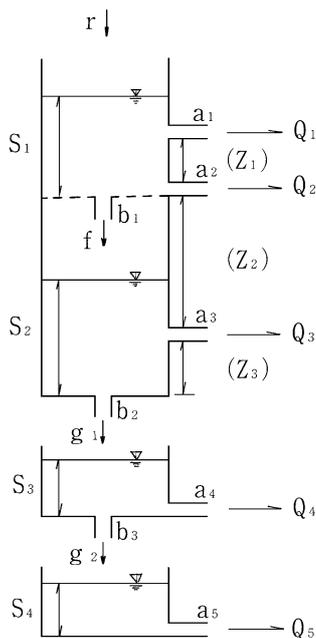


図 - 1 長短期流出両用モデル

なお，LST-II モデルは，図 - 1 に示すように 3 段のタンクで構成されており，各タンクの連続式は次式で与えられている．

$$dS_1/dt = r - f_g - Q_1 - Q_2 \dots\dots\dots (2)$$

$$dS_2/dt = f_g - Q_3 - g_1 \dots\dots\dots (3)$$

$$dS_3/dt = g_1 - Q_4 - g_2 \dots\dots\dots (4)$$

$$dS_4/dt = g_2 - Q_5 \dots\dots\dots (5)$$

ここに， $S_1 \sim S_4$ ：貯留量， $r$ ：降雨強度， $f_g$ ：浸入強度， $g_1, g_2$ ：下段タンクへの供給強度， $Q_1 \sim Q_5$ ：流出高で， $Q_1$  は表面流出， $Q_2$  は速い中間流出， $Q_3$  は遅い中間流出， $Q_4$  と  $Q_5$  は地下水流出が想定されている．

そして，第 1 段目タンク上層に次式で与えられる浸透能  $f$  に見合うだけの十分な貯留量がある場合，すなわち浸入強度  $f_g$  の時間的変化は，Horton の浸入能と同形の式で与えられるモデル構造となっていることが示されている．

$$f = b(Z_2 + Z_3 - S_2) \dots\dots\dots (6)$$

ここに， $f$ ：浸透能， $b_1$ ：定数， $Z_2, Z_3$ ：流出孔の高さ．

2. 応用 LST-II モデル

ここでは，上述の LST-II モデルのモデル定数，あるいは LST-II モデルに導入される「遅れ時間  $t_L$ 」が解析対象出水時の有効降雨との関連で議論できるように，LST-II モデル構造を以下のように若干変更した流出モデルを構築することとする．

2.1 流出モデル

長期流出と短期流出が同時に解析できるという LST-II モデルの特長を保持しつつ，LST-II モデル構造を活用した貯留型流出モデルとして，図 - 2 に示すような流出モデルを考える．ここでは，本流出モデルを応用 LST-II モデルと呼称することとする．

本流出モデルの基本構造は LST-II モデルと同じであり，したがって，図 - 2 に示す各段タンクからの流出高  $Q_1 \sim Q_5$  は LST-II モデルと同じ算定式を用いることとなる．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 - 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 - 2 に示す応用 LST-II モデルによる降雨遮断量，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  $I_1$  は，角屋・永井の提案による LST-II モデルで採用されている次式の形で算定する．

そして、当該流域への入力降雨系列  $r_i$  より降雨遮断量を差し引いた雨量系列  $r_a$  を直下の第 1 段タンク上層に入力する。

$$r_{a,i} = 3600 \{ R_i - (I_i - I_{i-1}) \} / t_r \dots\dots\dots (7)$$

$$I_i = (Z_0 - S_{00}) \{ 1 - \exp(-R_i / Z_0) \} \dots\dots\dots (8)$$

$$R_i = r_i \cdot t_r / 3600 \dots\dots\dots (9)$$

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

**低水流出高，浸透能，浸透高：**

$$Q_3 = a_3 (S_2 - Z_3) \\ = \alpha_1 a_3 (S_2 - Z_3) \text{ (for } S_2 > Z_3) \dots\dots\dots (10)$$

$$Q_3 = 0 \text{ (for } S_2 < Z_3) \dots\dots\dots (11)$$

$$Q_4 = a_4 S_3 = \alpha_1 a_4 S_3 \dots\dots\dots (12)$$

$$Q_5 = a_5 S_4 = \alpha_1 a_5 S_4 \dots\dots\dots (13)$$

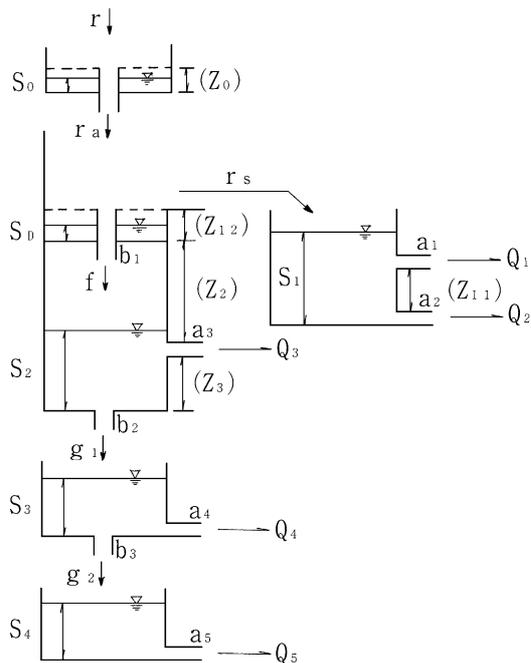


図 - 2 応用 LST-II モデル

$$f = b_1 (Z_2 + Z_3 - S_2) \\ = \alpha_1 b_1 (Z_2 + Z_3 - S_2) \dots\dots\dots (14)$$

$$g_1 = b_2 S_2 = \alpha_1 b_2 S_2 \dots\dots\dots (15)$$

$$g_2 = b_3 S_3 = \alpha_1 b_3 S_3 \dots\dots\dots (16)$$

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)、 $f$ ：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)、 $a_3 \sim a_5, b_1 \sim b_3$ ：LST-II モデルで

定義されている定数 ( $h^{-1}$ )、 $\alpha_1 = \alpha_s / B$ 、 $B$ ：流域平均斜面長 (m)、 $\alpha_s$ ：換算係数で計算単位時間を  $t_s$  秒としたとき、 $\alpha_s = t_s \times 10^{-2}$  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)、 $b_1 \sim b_3$ ：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  $E_i$  (mm/d) を石原・小葉竹の研究<sup>4)</sup>および角屋・永井の長短期流出両用モデルにおける手法<sup>1)</sup>を利用し、次式の形式で算定する。

$$E_i = E_1 + E_2 + E_3 \dots\dots\dots (17)$$

$$E_1 = E_0 - E_c, \text{ for } S_0 > 0, S_D > 0, S_1 > 0 \\ \text{or } S_2 > Z_3 \dots\dots\dots (18)$$

$$= S_1 (E_0 - E_c) / Z_3 \text{ for } S_0 = S_D = S_1 = 0, \\ \text{and } 0 < S_2 < Z_3 \dots\dots\dots (19)$$

$$E_2 = \tau E_c \text{ for } S_3 > 0 \dots\dots\dots (20)$$

$$E_3 = (1 - \tau) E_c \text{ for } S_4 > 0 \dots\dots\dots (21)$$

ここに、 $E_i$ ：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)、 $\tau$ ：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：**

$$Q_1 = a_1 (S_1 - Z_{11})^m \\ = \alpha_1 \{ (S_1 - Z_{11}) / a_1 \}^m, m = 5/3 \\ \text{(for } S_1 > Z_{11}) \dots\dots\dots (22)$$

$$Q_2 = a_2 S_1 \\ = \alpha_1 a_2 S_1 \text{ (for } S_1 < Z_{11}) \dots\dots\dots (23)$$

$$Q_2 = a_2 Z_{11} \\ = \alpha_1 a_2 Z_{11} \text{ (for } S_1 > Z_{11}) \dots\dots\dots (24)$$

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  $k_s / \lambda$  ( $k_s$ ：表層の透水係数、 $s$ ：斜面勾配、 $\lambda$ ：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えられる。

**連続の式：**

$$dS_0 / dt = r, r_a = 0 \text{ for } S_0 < Z_0 \text{ and } r > 0 \dots\dots\dots (25)$$

$$dS_0 / dt = 0, r - r_a = 0, \text{ for } S_0 = Z_0 \text{ and } r > 0 \dots\dots\dots (26)$$

$$dS_0 / dt = -E_1, \text{ for } 0 < S_0 < Z_0 \text{ and } r = 0 \dots\dots\dots (27)$$

$$dS_D/dt = r_a, \text{ for } 0 < S_D < Z_{12} \text{ and } r > 0 \dots\dots\dots (28)$$

$$dS_D/dt = 0, \text{ for } S_D = Z_{12} \text{ and } r > 0 \dots\dots\dots (29)$$

$$dS_D/dt = -E_1', \text{ for } S_D = 0, 0 < S_D < Z_{12} \text{ and } r = 0 \dots\dots\dots (30)$$

$$dS_1/dt = r_s - Q_1 - Q_2 \dots\dots\dots (31)$$

$$dS_2/dt = f_g - Q_3 - g_1 - E_1', \text{ for } S_2 < Z_3 \dots\dots\dots (32)$$

$$dS_2/dt = f_g - g_1 - E_1', \text{ for } S_2 < Z_3 \dots\dots\dots (33)$$

$$dS_3/dt = g_1 - Q_4 - g_2 - E_2' \dots\dots\dots (34)$$

$$dS_4/dt = g_2 - Q_5 - E_3' \dots\dots\dots (35)$$

ここに、 $S_0$ ：降雨遮断タンクの貯留量 (mm),  $t$ ：時間 (h),  $r$ ：各ブロックへの入力降雨強度 (mm/h),  $r_a$ ：降雨遮断効果を受けた後の降雨量 (mm/h),  $r_s$ ：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),  $S_1 \sim S_4$ ：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),  $Z_{12}$ ：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  $E_1' \sim E_3'$  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。

**有効降雨の算定：**

まず、入力降雨  $r$  が (7)~(9) 式で算定される降雨遮断効果を受けた後の降雨量  $r_a$  を算定し、次いで、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  $r_c$  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、 $r_s = r_c - f_g$  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量  $f_g$  は、(i) 計算単位時間  $\Delta t_s$  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、(ii)  $\Delta t_s$  内に浸透能  $f$  に見合うだけの降雨がなく、 $f_g$  が  $\Delta t_s$  内の降雨量に規定され、 $f_g = r(r_c < f, \bar{f}$  は  $\Delta t_s$  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  $S_0, S_D, S_2 \sim S_4$  及び低水流出高  $Q_3 \sim Q_5$  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(22)に示す  $a_1$  は表面流モデルの斜面流動定数  $k$  に相当する定数 ( $m^{-1/5} s^{3/5}$ ) であり、式(23)(24)の  $a_2$  は中間流モデル定数  $k_1/s/\lambda$  に相当する定数 (cm/s) として定義している。これは、モデル定数を  $a_1, a_2$  の代わりに  $a_1'$  及び  $a_2'$  で同定した場合、表面流モデル及び中間流モデルのモデル定数と関連付けた議論が同一の次元で比較可能となることを意図して定義したものである。

**低水流出高の算定：**

いま、図-2に示す応用LST-IIモデルにおいて、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段タンク上層部からの補給高  $f_g$  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。

**2.3 流出解析の手順**

応用LST-IIによる流出解析の手順は以下のとおりであ

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	$Z_3 < S_2 < S_{2u}$	$Q_3 = 0$	$f_g = 0$	$E_t = 0$
2	2	$0 < S_2 < Z_3$	$Q_3 = 0$	$f_g = 0$	$E_t = 0$
3	3-I	$0 < S_2 < Z_3$	$Q_3 = 0$	$f_g = f$	$E_t = 0$
4	3-II	$0 < S_2 < Z_3$	$Q_3 = 0$	$f_g = f_0$	$E_t = 0$
5	4-I	$Z_3 < S_2 < S_{2u}$	$Q_3 = 0$	$f_g = f$	$E_t = 0$
6	4-II	$Z_3 < S_2 < S_{2u}$	$Q_3 = 0$	$f_g = f_0$	$E_t = 0$
7	5	$S_2 = S_{2u}$	$Q_3 = 0$	$f_g = f_c$	$E_t = 0$

る。

i) まず，計算単位時間毎の流域平均降雨量  $r$  から降雨遮断量を差し引く。ここで，降雨遮断量は (7)~(9) 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  $\Delta t_s$  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)  $r_e = 0$  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  $\Delta t_s$  内の平均浸透能で，(14) 式により算定する。ただし， $S_2$  は，時刻  $t \sim t + \Delta t_s$  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  $\Delta t_s$  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 (4) 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， $r_e = \bar{f}$  のときは  $f_g = f_0 = r_e$  で与えられる。

vi) 時刻  $t$  の貯留量  $S_2 \sim S_4$  を既知とし， $\Delta t_s$  時間後の貯留量  $S_2 \sim S_4$  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 (32)~(35)，(10)~(21) 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  $S_2 \sim S_4$  に関する常微分方程式が得られ，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  $\Delta t_s$  時間後の時刻  $t + \Delta t_s$  における貯留量  $S_2(t + \Delta t_s) \sim S_4(t + \Delta t_s)$  及び時刻  $t \sim t + \Delta t_s$  間の平均貯留量  $\bar{S}_2(t + \Delta t_s) \sim \bar{S}_4(t + \Delta t_s)$  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  $S_2(t) \sim S_4(t)$  を既知としたとき，計算単位時間  $\Delta t_s$  時間後の時刻  $t + \Delta t_s$  における貯留量  $S_2(t + \Delta t_s) \sim S_4(t + \Delta t_s)$  の値を算定することにより，これらの値を (10)~(13) 式に代入し，時刻  $t + \Delta t_s$  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  $Q_B = \sum Q_i$  ( $i = 3, 4, 5$ ) 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。

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，(31) 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 (22)~(24) 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。

$$Q' = Q \cdot A / 3.6 \dots \dots \dots (36)$$

ここに， $A$ ：流域面積 ( $km^2$ )

なお，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。

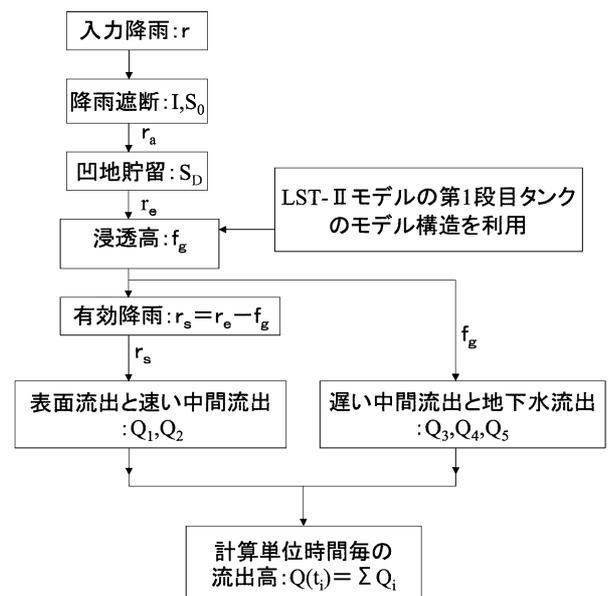


図 - 3 応用 LST-II モデルによる流出計算フローチャート

### 3. 応用 LST-II モデルの適用事例

図 - 4 は，斐伊川流域（大津地点，集水面積 911  $4km^2$ ）における応用 LST-II モデルの適用事例である。

洪水時の遅れ時間  $t_d = 3$  (h) とした本解析事例では，観測ピーク流量  $1481m^3/s$  に対し，計算ピーク流量が  $1734m^3/s$  と過大評価されているが，観測流出量ハイドログラフは相対誤差 8% と良好な再現結果となっている。

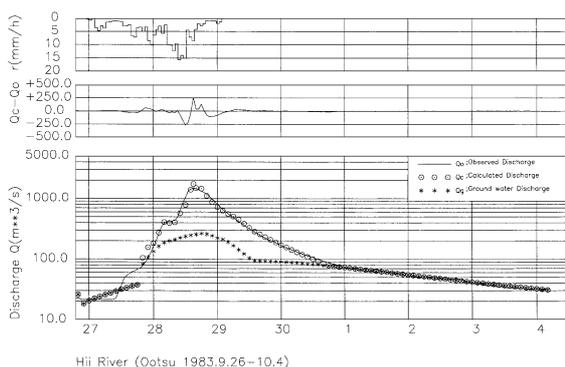


図-4 応用 LST-II モデルの適用事例

表-2 流出モデル定数 (大津集水域)

モデル定数	KiWS モデル		応用 LST-II モデル
	集中定数型	分布定数型	
$a_1$ ( $m^{-1/5} \cdot s^{3/5}$ )	1.2	1.4	0.5
$a_2$ ( cm/s )	12.6	3.0	19.4
$a_3$ ( cm/s )	2.4	2.4	7.4
$a_4$ ( cm/s )	1.29	2.20	1.4
$a_5$ ( cm/s )	0.027	0.025	0.021
$b_1$ ( cm/s )	24.0	21.7	18.8
$b_2$ ( cm/s )	6.3	3.8	12.9
$b_3$ ( cm/s )	4.8	2.9	3.6
$Z_{i1}$ ( mm )	6	2	20.0
$Z_{i2}$ ( mm )	4	9	0.0
$Z_{i3}$ ( mm )	80	65	82
$Z_{i4}$ ( mm )	20	20	25
$J_{i1}$ ( mm/h )	0.015	0.023	0.010
$J_{i2}$ ( % )	8.1	15.0	7.9
$t_{pc}$	15:00	15:00	15:00
$t_{po}$	15:00	15:00	15:00
$Q_p$ ( $m^3/s$ )	1370	1295	1734
$Q_{p0}$ ( $m^3/s$ )	1481	1481	1481
$B$ ( m )	10,540	-	10,540

表-2の第4欄に最適同定された応用 LST-II モデルのモデル定数を示す。同表には、集中定数型 KiWS モデル及び分布定数型 KiWS モデルで最適同定して得られたモデル定数<sup>5)</sup>がそれぞれ第2,3欄に併記してある。なお、表-2に示す応用 LST-II モデルのモデル定数のうち、 $a_1 \sim a_5$ 、 $b_1 \sim b_3$ は式(10)~(16)及び(22)~(24)で定義したモデル定数で、集中定数型 KiWS モデル及び分布定数型 KiWS モデルのモデル定数と同一の単位を有し、これら KiWS モデルモデル定数との相互比較が可能である。応用 LST-II モデルは、基本的には雨水流モデルをベースとしながらも、これを強度に集中化した貯留型流出モデルであるため、集中定数型 KiWS モデル及び分布定数型 KiWS モデ

表-3 LST-II モデル定数との比較 (大津集水域)

モデル定数	LST-II モデル (標準的定数)	応用 LST-II モデル
$a$ ( $mm^{-2/3} \cdot h^{-1}$ )	0.006	0.002
$a_1$ ( $h^{-1}$ )	0.05	0.07
$a_2$ ( $h^{-1}$ )	0.01	0.03
$a_3$ ( $h^{-1}$ )	0.002	0.005
$a_4$ ( $h^{-1}$ )	0.0001	0.0001
$b$ ( $h^{-1}$ )	0.06	0.06
$b_1$ ( $h^{-1}$ )	0.008	0.044
$b_2$ ( $h^{-1}$ )	0.002	0.012
$Z_{i1}$ ( mm )	30	20
$Z_{i2}$ ( mm )		0
$Z_{i3}$ ( mm )	80	82
$Z_{i4}$ ( mm )	20	25

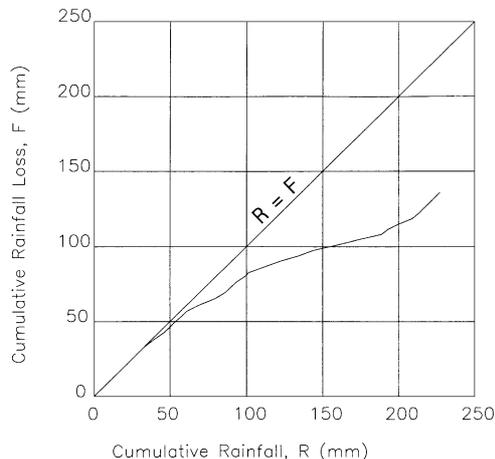


図-5 雨水保留量曲線 (応用 LST-II モデル)

ルのモデル定数と大きな差異が認められる。特に、表面流出及び中間流出を想定したモデル定数の差異が顕著といえる。

また、表-3は、上述の出水で最適同定された応用 LST-II モデルのモデル定数と永井の研究による LST-II モデルの標準的定数とを比較したものである。斐伊川流域における一出水のみ適用例であり、今後出水規模の異なる適用検討が必要であるが、表面流出及び中間流出を規定するモデル定数の差異に流域固有の流出特性が反映していることが伺える。

図-5は、応用 LST-II モデルを上述の出水に適用した際に得られた有効降雨系列から雨水保留量曲線を図示したものである。総雨量 227mm に対し総有効雨量が 91mm となり、したがって、総雨水保留量は 136mm と推定されている。このように応用 LST-II モデルの適用により、有効降雨系列あるいは雨水保留量曲線が、自動的に算定さ

れることとなった。通常、雨水流モデルの適用に際して用いられる雨水保留量曲線は、総雨量  $R$  と観測流出量ハイドログラフから直接流出成分を分離して推定した総有効雨量  $R_E$  との差から算定される雨水保留量  $R(R = R - R_E)$  と総雨量  $R$  との関係を図示したものである。したがって、観測ハイドログラフのピーク部を形成する有効降雨が必ずしも的確に評価されがたいという難点を有している。その点、応用 LST-II モデルで算定される有効降雨は、入力降雨と浸透能との相互関係に基づいて推定しているので、特に降雨ピーク部の有効降雨の推定が改善されていると思われる。

図 - 5 においては、累加雨量が 100mm ~ 190mm となる降雨期間が降雨波形のピーク部を形成しており、雨水保留量曲線の軌跡に入力降雨と浸透能との相互関係に基づく有効降雨系列が反映していることになる。したがって、今後、本流出モデル定数の検討にこうした有効降雨系列特性ないし雨水保留量特性とも関連付けた議論が可能となったといえる。

## あ と が き

本報告で提示した応用 LST-II モデルの適用性が認められ、また、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となった。

今後、流域特性、出水規模、出水形態ならびに流域条件の改変・整備に伴う出水への影響等の検討が必要であるが、貯留型流出モデルで評価される有効降雨情報の活用が期待される。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分布型流出モデルへ拡張した検討も可能と考えている。

## 引用文献

- 1) 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)
- 2) 角屋 睦・田中丸治哉・永井明博・金口正幸：愛知川上流域への長短期流出両用モデルの適用と実時間洪水予測，水資源研究センター研究報告，9，pp 45-60 (1989)
- 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) 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)
- 5) 福島 晟・武田育郎・森 也寸志：流域内の降雨分布特性を組込んだ分布型流出モデルとその適用例，島根大学生物資源科学部研究報告，7，pp 81-88 (2002)