

モデル定数の有効桁を設定した流出モデルの同定手法とその適用例

福島 晟・武田育郎・森 也寸志

An Identification Method of Runoff Model setting a Significant Digit on the Model Parameter and Its Application Cases

Akira FUKUSHIMA, Ikuo TAKEDA and Yasushi MORI

Abstract This report proposes a modification method of the mathematical optimization technique by the Standard Powell method which is proposed by A. Nagai and M. Kadoya, that is necessary to identify the runoff model involving parameters which have quantitative relationships of a different order. The outline is as follows.

(1) The modified Standard Powell method is introduced, in which each model parameter is identified to a searched value as sum of an initial value and a value multiplied for a constant small term of model parameter. It is considered that a significant digit for model parameter is set to the small term. So, a set of model parameter is searched by a step wise till converging to optimum values.

(2) Three type models are applied to the identification of runoff model. The first type one is the long and short terms runoff model (LST-II), which is developed by Kadoya and Nagai (1988) for analyzing both flood and long term runoff successively. The second type one is the modified LST-II model, in which the effects of distribution of permeable area and impermeable one in the basin is expressed by applying the structure of the upper zone of first tank LST-II. The third type one is a lumped type model combined the LST-II model with kinematic wave one, named as the lumped KiWS model.

(3) These three type runoff models are adapted to the small experimental basin at land reclamation area in Masuda City and Hii river basin as large scale one. For the representative floods, the model are identified by using the modified SP method. It is shown that the proposed method is improved with respect to evaluate the set of model parameter in the any significant digit designated for each parameter. And it is recognized that the reproducibility of the peak discharge and the observed hydrograph is better for the modified LST-II model than the LST-II model and the lumped KiWS model.

Key word: Runoff model; runoff analysis; flood runoff

ま え が き

これまで筆者らは、FORTRAN77 プログラムによる流出解析を島根大学情報処理センター等のメインフレームを中心としたシステムの利用により行ってきたが、昨年度、FORTRAN77 及び Fortran90 によるプログラ

ム開発が可能な UNIX ワークステーションが導入できたことに伴い、計算機利用環境が大幅に変化した。そして、計算機の管理及びプログラム開発の面で新たな対応が必要となったことを実感しつつある。本報告では、UNIX ワークステーションを利用した FORTRAN77 プログラムによる流出解析を実行する際に遭遇したいくつかの問題のうち、基準化パウエル法 (SP 法) による流出モデ

ル定数の探索法¹⁾について若干検討した結果について述べる。

1. 流出モデル

流出モデルとして、以下の3種の流出モデルを対象に検討することとする。すなわち、①流出モデルI：角屋・永井によって提案された長短期流出両用モデル LST-II²⁾、②流出モデルII：流域内の不浸透面積率の影響を組込んだ LST-II モデルの応用モデル、③流出モデルIII：集中定数型 KiWS モデル (Kinematic Wave Storage Model)を用いる。

流出モデル I :

流出モデル I, すなわち LST-II モデル²⁾は、角屋・永井によって開発された流出モデルであり、長期と短期の流出を同時に解析できること、とくに Horton 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。本流出モデルの構造は図1に示すように3段のタンクで構成されている。計算単位時間毎の流域平均降雨量は、樹木等による降雨遮断量を評価した後、第1段タンクへ入力される。第1段タンクは上層と下層に分かれており、Manning 型表面流出、早い中間流出及び遅い中間流出に対応した流出成分が算定できる構造となっている。

降雨遮断量、流出高、浸透能、浸透高及び各段タンクの連続式は以下のように表されている。

降雨遮断量；

$$r_{a,i} = 3600 \{R_i - (I_i - I_{i-1})\} / \Delta t_i \quad \dots (1)$$

$$I_i = (Z_0 - S_{00}) \{1 - \exp(-R_i / Z_0)\} \quad \dots (2)$$

$$R_i = \sum r_i \Delta t_i / 3600 \quad \dots (3)$$

ここに、 R_i ：入力降雨の単位時間を Δt_i 秒としたとき、 $i \Delta t_i$ 時刻までの累加雨量 (mm) ($i = 0, 1, 2, \dots$)、 I_i ： $i \Delta t_i$ 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 $(i-1) \Delta t_i \sim i \Delta t_i$ 間の降雨量 (強度) (mm/h)、 $r_{a,i}$ ：時刻 $(i-1) \Delta t_i \sim i \Delta t_i$ 間の降雨遮断効果を受けた後の降雨量 (強度) (mm/h)。

流出高；

$$Q_1 = a_1 (S_1 - Z_1)^m \quad (\text{for } S_1 \geq Z_1) \quad \dots (4)$$

$$Q_2 = a_2 S_1 \quad \dots (5)$$

$$Q_3 = a_3 (S_2 - Z_3) \quad (\text{for } S_2 \geq Z_3) \quad \dots (6)$$

$$Q_4 = a_4 S_3 \quad \dots (7)$$

$$Q_5 = a_5 S_4 \quad \dots (8)$$

浸透能、浸透高；

$$f = b_1 (Z_2 + Z_3 - S_2) \quad \dots (9)$$

$$g_1 = b_2 S_2 \quad \dots (10)$$

$$g_2 = b_3 S_3 \quad \dots (11)$$

連続の式；

$$dS_1/dt = r_a - Q_1 - Q_2 - f \quad \dots (12)$$

$$dS_2/dt = f - Q_3 - g_1 \quad \dots (13)$$

$$dS_3/dt = g_1 - Q_4 - g_2 \quad \dots (14)$$

$$dS_4/dt = g_2 - Q_5 \quad \dots (15)$$

ここに、 $Q_1 \sim Q_5$ ：各流出成分に対応する流出高 (mm/h) で、 Q_1 は表面流出、 Q_2 は早い中間流出、 Q_3 は遅い中間流出、 Q_4 、 Q_5 は地下水流出を表している。 $S_1 \sim S_4$ ：貯留量 (mm)、 $a_1 \sim a_5$ ：定数、 $b_1 \sim b_3$ ：定数、 $Z_1 \sim Z_3$ ：流出孔の高さ (mm)、 $m=5/3$ 、 f ：浸透能 (mm/h)、 g_1 、 g_2 ：浸透高 (mm/h)、 t ：時間 (h)、 r_a ：降雨遮断効果を受けた後の降雨強度 (mm/h)。

流出モデル II :

流域内の水路整備、道路整備あるいは舗装化等の地文条件の変化に起因する雨水の遮断、凹地貯留、浸透量の減少効果を流出モデルに簡便に組み込むことを考える。図2に示すように LST-II モデルを若干修正したモデルを流出モデル II とする。すなわち、水路網や舗装道路網の整備の効果を検討するため、それらの全流域に対する面

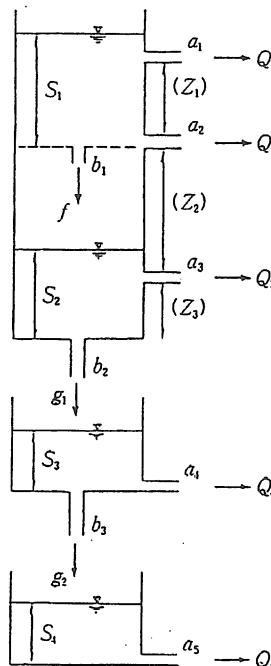


図1 流出モデル I (LST-II モデル)

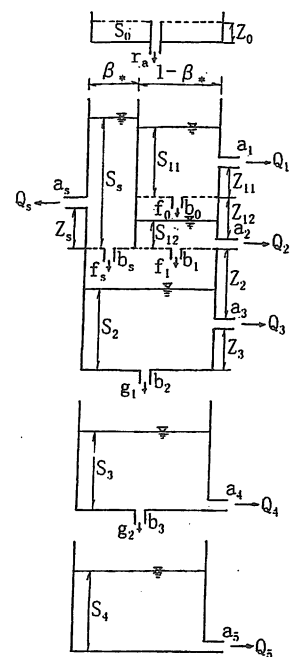


図2 流出モデル II

積割合 β_* を導入し、LST-IIモデルの第1段タンク上層部を β_* : $(1 - \beta_*)$ の比で分割したモデルを想定したものである。

ただし、農地造成地等を想定し、凹地貯留 Z_s ないし Z_{11} を取入れる。すなわち、左側タンク部分からは $S_s > Z_s$ のとき Manning 型の表面流出高 Q_s 、また右側タンクからは $S_{11} > Z_{11}$ のとき表面流出高 Q_1 、及び貯留量 S_{12} による早い中間流出高 Q_2 を算定する構造となっている。

本流出モデルによる計算基礎式は次のとおりである。

流出高；

$$Q_s = a_s(S_s - Z_s)^m \quad \dots (16)$$

$$Q_1 = a_1(S_{11} - Z_{11})^m \quad \dots (17)$$

$$Q_2 = a_2 S_{12} \quad \dots (18)$$

$$Q_3 = a_3(S_2 - Z_3) \quad \dots (19)$$

$$Q_4 = a_4 S_3 \quad \dots (20)$$

$$Q_5 = a_5 S_4 \quad \dots (21)$$

浸透能、浸透高；

$$f_s = b_s(Z_2 + Z_3 - S_2) \quad \dots (22)$$

$$f_0 = b_0(Z_{12} - S_{12}) \quad \dots (23)$$

$$f_1 = b_1(Z_2 + Z_3 - S_2) \quad \dots (24)$$

$$g_1 = b_2 S_2 \quad \dots (25)$$

$$g_2 = b_3 S_3 \quad \dots (26)$$

連続の式；

$$dS_s/dt = r_a - Q_s - f_s \quad \dots (27)$$

$$dS_{11}/dt = r_a - Q_1 - f_0 \quad \dots (28)$$

$$dS_{12}/dt = f_0 - Q_2 - f_1 \quad \dots (29)$$

$$dS_2/dt = \beta_* f_s + (1 - \beta_*) f_1 - Q_3 - g_1 \quad \dots (30)$$

$$dS_3/dt = g_1 - Q_4 - g_2 \quad \dots (31)$$

$$dS_4/dt = g_2 - Q_5 \quad \dots (32)$$

ここに、 Q_s : 表面流出高 (mm/h), f_s : 浸透能 (mm/h) S_s : 貯留量 (mm), Z_s : 流出孔の高さ (mm), a_s, b_s : 定数を表している。また、 β_* : 第1段タンク上層部における表面流出 Q_s の発生場面積比である。その他の変数及びモデル定数の記号は流出モデルIIと同じである。

なお、流出モデルIIによる流出計算においては、本流出モデルに面積比 β_* が導入されていることから、解析対象地点の計算単位時間毎の流出高 q (mm/h) 及び流出量 Q (m³/s) は次式から算定されることになる。

$$q = \beta_* Q_s + (1 - \beta_*) (Q_1 + Q_2) + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad \dots (33)$$

$$Q = q \cdot A / 3.6 \quad \dots (34)$$

ここに、 A : 流域面積 (km²)

流出モデルIII：

流出モデルIIIは、雨水流モデルと長短期流出両用モデルを統合したモデルであり、かつ集中定数型 KiWS モデル³⁾と呼んでいる流出モデルである。本流出モデルは、LST-IIモデルにおいて、樹木等による降雨遮断効果及び第1段タンク下層部、第2～3段タンクはそのまま利用して、降雨遮断量、遅い中間流出量、地下水流出量を算定する一方、表面流出、早い中間流出で形成される斜面流には雨水流モデル(表面流・早い中間流の複合流形式の雨水流モデル)を適用する流出モデルである。なお、ここで、流域平均斜面長 B の斜面域での表面流及び早い中間流の伝播特性のみを考慮し、河道流計算を組み込まない流出モデルとしているため、集中定数型 KiWS モデルと略称している。また、本流出モデル定数 a_1, a_2 はそれぞれ表面流モデルの斜面流動定数 k (m^{-1/5}・s^{3/5}) 及び中間流モデルの定数 $k_t \cdot s / \lambda$ (cm/s) に対応している。

2. 流出モデル定数の探索手法

流出モデルの最適同定には、永井・角屋により開発された数学的最適化手法の一種である基準化パウエル法(SP法)を適用することとする。SP法を適用して流出モデルを同定する場合、UNIXワークステーションと対話処理しながら、次式で表される基準化変数 x_1, x_2, \dots, x_n を最適同定し、最終的に一組の最適モデル定数 (a_1, a_2, \dots, a_n)_{opt} に収束するまで繰り返し流出計算を進める。

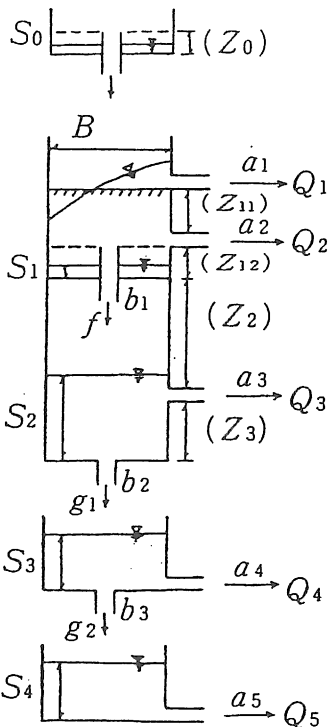


図3 流出モデルIII (集中型 KiWS モデル)

$$x_1 = a_1/a_{10}, x_2 = a_2/a_{20}, \dots, x_n = a_n/a_{n0} \dots (35)$$

ここに $a_{10}, a_{20}, \dots, a_{n0}$ はモデル定数の初期値である。この SP 法を適用して流出モデル定数を探索する場合、次式で表される目的関数を設定して、その関数の最小化問題に置き換え、関数値が小さくなる方向に探索点を逐次移動させていくことになる。

$$J_{XS} = \frac{1}{MD} \sum \frac{(Q_{ci} - Q_{oi})^2}{Q_{oi}} \dots (36)$$

ここに、 J_{XS} : 誤差評価基準(mm/h)、 Q_{ci} : 計算流出高(mm/h)、 Q_{oi} : 観測流出高(mm/h)、MD : データ数。さらに、出水規模に関わらず、流出ハイドログラフの再現性がどの程度であるかが直感的に理解しやすいように、次式で表される相対誤差(%)も計算し、併示することにする。

$$J_{RE} = \frac{1}{MD} \sum \frac{|(Q_{ci} - Q_{oi})|}{Q_{oi}} \dots (37)$$

この SP 法を適用する場合、探索点が関数応答面の局所的窪みの底に到達し、局所的準最適解に陥りやすいという難点があることが指摘されており、実際にはこの局所的最小点を次回の流出計算の際の探索出発点(モデル定数初期値)として与え、所定の収束条件を満たすまで流出計算を繰り返すことになる。このような問題に対し、田中丸⁴⁾は、大域的探索法として分類される SCE-UA 法がタンクモデル定数の探索に有効であり、また探索効率の面でも他の各種の探索法に比較して、SCE-UA 法が最良であると報告している。一方、永井⁵⁾は、LST-II モデルの標準的な定数を提示し、その標準的長短期流出両用モデルの適応性を実証している。

このように、局所的探索法である SP 法は、大域的探索法に比較して、難点を有しているが、永井の研究成果による LST-II モデルの標準的定数を解析対象流域のモデル定数探索の際の初期値として活用すれば、流出モデルの同定結果が探索出発点の良否に依存するという SP 法の難点が緩和されると思われる。さらに、SP 法の適

用の際、目的関数が最小値に収束する前、あるいはモデル定数が最適値に収束する前に、複数の極小点に探索点が到達することが多いことから、各モデル定数の有効桁に配慮しつつ繰り返し流出計算が進められるように、ここでは、以下のようなモデル定数探索手法を試みることにする。

上述の SP 法における基準化変数 x_1, x_2, \dots, x_n に対応する変数として、新たな変数 M_1, M_2, \dots, M_n を導入し、次式によりモデル定数 a_1, a_2, \dots, a_n が探索されるものとする。

$$a_1 = a_{10} + \Delta a_1 M_1, a_2 = a_{20} + \Delta a_2 M_2, \dots, a_n = a_{n0} + \Delta a_n M_n \dots (2)$$

ここで、 M_1, M_2, \dots, M_n は整数で、たとえば $M_1 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ の値をとるものとする。また、 $a_{10}, a_{20}, \dots, a_{n0}$ はモデル定数の初期値であり、 $\Delta a_1, \Delta a_2, \dots, \Delta a_n$ はそれぞれモデル定数探索の刻み幅を与える一定値である。

各モデル定数 a_1, a_2, \dots, a_n 及びモデル定数の初期値は非負であるから、 $M_i > -a_{i0} / \Delta a_i (i=1, 2, \dots, n)$ の制約条件が設定され、各モデル定数 a_1, a_2, \dots, a_n の探索範囲の下限値は零である。

また、SP 法を適用した研究において(35)式の $x_i = a_i / a_{i0} (i=1, 2, \dots, n)$ の探索域として、 $1/5 \leq x_i \leq 5$ 程度 ($i=1, \dots, n$)、ないし $1/10 \leq x_i \leq 10$ 程度で検討されていることを参考にすると、変数 M_1, M_2, \dots, M_n の最大値 $(M_i)_{max}$ は $(4 \sim 9)a_{i0} / \Delta a_i$ 程度の値が設定できるといえる。

3. 流出モデル同定手法の適用例

斐伊川流域及び益田開拓農地造成域を対象に、前項2. 述べた流出モデルの同定手法を適用してみる。

解析対象出水は、表1に示すように、斐伊川流域では、大津、木次及び三刀屋の3地点(それぞれの集水面積は 911.4, 451.0, 195.8km²)で観測された1983年9月出水、また益田開拓農地造成域では1983年7月出水とし、前

表1 対象流域と解析対象出水

流域名	地点	流域面積(km ²)	出水年月	ピーク流量(m ³ /s)
斐伊川流域	大津	911.4	1983.9	1481
斐伊川流域	木次	451	1983.9	787
斐伊川流域	三刀屋	195.8	1983.9	319
益田開拓農地造成域	防災ダム	0.296	1983.7	8.17

項1.で述べた3種の流出モデルの同定を試みる。

LST-IIモデルによる流出解析に際し、永井の提示したLST-IIモデルの標準的定数をモデル定数初期値として採用する。また前項2.で提示したモデル定数の探索手法を適用する場合、LST-IIモデル定数の探索刻みを解析条件として予め設定しておく必要がある。ここでは、探索するモデル定数のオーダーを考慮して、表2に示すような値を与えて解析を進めることとした。

斐伊川流域における適用例：

斐伊川流域におけるLST-IIモデルの適用の際には、大

津、木次及び三刀屋の3集水域とも、表2のCase 1として示すモデル定数刻みを与えることとした。すなわち、LST-IIモデル定数の探索刻み幅は、 $\Delta a_1, \Delta a_4, \Delta b_2, \Delta b_3$ を0.001, $\Delta a_2, \Delta a_3, \Delta b_1$ を0.01, Δa_5 を0.0001, $\Delta Z_1, \Delta Z_2, \Delta Z_3$ を5.0とした。一方、集中定数型KiWSモデルについてもLST-IIモデルの標準的定数の値を参考にして設定した。同定されたLST-IIモデル定数を永井の研究成果による標準的定数とともに表3に示す。同表のモデル定数の欄の J_{rs} (mm/h)以下の記号は次のとおりである。

表2 モデル定数の探索刻み幅

流域名 モデル定数	斐伊川流域		益田農地造成域		
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
$\Delta a_s(\text{mm}^{-2/3}\text{h}^{-1})$	—	—	—	—	0.01
$\Delta a_1(\text{mm}^{-2/3}\text{h}^{-1})$	0.001	0.1	0.1	0.01	0.01
$\Delta a_2(\text{h}^{-1})$	0.01	0.1	0.1	0.01	0.01
$\Delta a_3(\text{h}^{-1})$	0.01	0.1	0.01	0.001	0.001
$\Delta a_4(\text{h}^{-1})$	0.001	0.01	0.001	0.001	0.001
$\Delta a_5(\text{h}^{-1})$	0.0001	0.001	0.0001	0.0001	0.0001
$\Delta b_s(\text{h}^{-1})$	—	—	—	—	0.001
$\Delta b_0(\text{h}^{-1})$	—	—	—	—	0.001
$\Delta b_1(\text{h}^{-1})$	0.01	0.1	0.01	0.001	0.001
$\Delta b_2(\text{h}^{-1})$	0.001	0.1	0.01	0.001	0.001
$\Delta b_3(\text{h}^{-1})$	0.001	0.01	0.01	0.001	0.001
$\Delta Z_s(\text{mm})$	—	—	—	—	0.1
$\Delta Z_{11}(\text{mm})$	5	1	1	1	1
$\Delta Z_{12}(\text{mm})$		1	—	1	1
$\Delta Z_2(\text{mm})$	5	5	20	1	1
$\Delta Z_3(\text{mm})$	5	5	10	1	1
$\Delta S_{10}(\text{mm})$	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
$\Delta S_{20}(\text{mm})$	1	1	1	1	1
$\Delta S_{30}(\text{mm})$	1	1	10	1	1
$\Delta S_{40}(\text{mm})$	1	1	20	1	1

表3 流出モデルIのモデル定数（斐伊川流域）

モデル定数	標準的定数	大津	木次	三刀屋
$a_1(\text{mm}^{-2/3}\text{h}^{-1})$	0.006	0.004	0.006	0.001
$a_2(\text{h}^{-1})$	0.05	0.05	0.04	0.05
$a_3(\text{h}^{-1})$	0.01	0.01	0.01	0.01
$a_4(\text{h}^{-1})$	0.002	0.001	0.002	0.002
$a_5(\text{h}^{-1})$	0.0001	0.0003	0.0001	0.0001
$b_1(\text{h}^{-1})$	0.06	0.05	0.05	0.07
$b_2(\text{h}^{-1})$	0.008	0.013	0.010	0.010
$b_3(\text{h}^{-1})$	0.002	0.001	0.001	0.003
$Z_1(\text{mm})$	30	30	30	15
$Z_2(\text{mm})$	80	90	85	80
$Z_3(\text{mm})$	20	20	20	20
$J_{rs}(\text{mm/h})$		0.012	0.009	0.019
$J_{re}(\%)$		10.4	9.5	10.4
t_{pc}		15:00	13:00	14:00
t_{po}		15:00	13:00	14:00
$Q_{pc}(\text{m}^3/\text{s})$		1566	782	307
$Q_{po}(\text{m}^3/\text{s})$		1481	787	319
$t_L(\text{h})$		4	2	0

**表4 流出モデルIIIのモデル定数
（斐伊川流域及び益田開拓農地造成域）**

モデル定数	大津	木次	三刀屋	音無川
$a_1(\text{m}^{-1/5} \cdot \text{s}^{3/5})$	1.3	1.2	1.4	1.9
$a_2(\text{cm/s})$	12.7	8.6	8.8	4.0
$a_3(\text{cm/s})$	0.9	2.5	4.2	0.01
$a_4(\text{cm/s})$	0.87	1.32	1.80	0.003
$a_5(\text{cm/s})$	0.029	0.043	0.054	0.0029
$b_1(\text{cm/s})$	19.9	14.9	11.1	0.5
$b_2(\text{cm/s})$	4.0	10.9	10.2	0.065
$b_3(\text{cm/s})$	3.42	1.75	2.14	0.016
$Z_{11}(\text{mm})$	7	5	12	3
$Z_{12}(\text{mm})$	1	3	27	5
$Z_2(\text{mm})$	80	80	80	80
$Z_3(\text{mm})$	20	20	20	20
$J_{rs}(\text{mm/h})$	0.018	0.005	0.017	0.473
$J_{re}(\%)$	8.1	7.6	9.9	22.1
t_{pc}	15:00	14:00	15:00	6:40
t_{po}	15:00	13:00	14:00	7:00
$Q_{pc}(\text{m}^3/\text{s})$	1375	727	296	7.23
$Q_{po}(\text{m}^3/\text{s})$	1481	787	319	8.17
$B(\text{m})$	10,540	6,120	3,583	138

J_{xs} (mm/h):(20)式で算定される評価基準, J_{re} (%): (21)式で算定される相対誤差, t_{pc} , t_{po} :それぞれ計算ピーク流量発生時刻, 観測ピーク流量発生時刻, Q_{pc} , Q_{po} :それぞれ計算ピーク流量, 観測ピーク流量, t_L (h):遅れ時間で, 流域平均降雨量を t_L (h)だけスライドした時刻に LST-II モデルへの入力降雨とする. この遅れ時間は雨水の斜面伝播時間に対して, 河道伝播時間が無視し得なくなる場合に導入されている. したがって, モデル定数は, 流域斜面系の特性を反映したものとして探索されることになる. 表3に示すように, モデル定数 a_1 は, 大津集水域での値が標準的モデル定数の値と比較すると, 2/3, 三刀屋集水域では, 1/6の値となっている. 田中丸の長短期流出両用モデル定数の理論的考察により, 流域面積が大きくなるほど a_1 の値は小さくなることが示されているので, 三刀屋集水域での値も含めて, a_1 の値についてはなお検討の余地があるといえる. しかし, 観測ハイドログラフの再現性に関しては, 3集水域とも相対誤差で約10%程度と良好であることから, 各集水域の特性を反映したモデル定数が評価されていると判断できる. また, モデル定数から算定される S_2 , g_1 及び Q_3 の最大値等のモデル特性値も標準的な値に近似した値が得られる. 一方, KiWS モデルについても, ここで提案したモデル定数探索手法を適用した結果, 表4に示すような結果が得られた. 同表において, 表面流出を規定す

るモデル定数 a_1 は, 表面流出モデルの斜面流動定数 k を意味しており, 3集水域で1.2~1.4程度の値が得られている. 本流出モデルのモデル定数についても, 流域面積等の流域スケールとの関係でさらに検討を要するが, 観測ハイドログラフの再現性は相対誤差で約8%と良好な結果となっている. ただし, ピーク流量については, 計算値が過小評価の傾向にあり, この点についても今後の課題といえる. しかし, 3集水域とも同じ傾向が認められることから, 集中型 KiWS モデルによる適用性の限界を意味しているとも思われる. したがって, 今後は雨水の河道伝播特性の効果を組入れた検討, あるいは分布型 KiWS モデルでの検討も併せて行う必要があると言える.

益田開拓農地造成域における適用例:

益田開拓農地造成域(流域面積=0.296km², 平均斜面長 $B=138$ m)における1983年7月出水時の観測資料に基づいて, 前項1.に示した3種の流出モデルの同定を試みた.

本流域の場合, モデル定数の探索刻み幅 $\Delta a_1, \Delta a_2, \dots, \Delta a_n$ 等は, 斐伊川流域の場合と異なり, 表2のCase3, 4, 5のように設定した. すなわち, LST-II モデルの同定は, まず表3のCase3に示すように, まず各モデル定数の探索刻み幅をやや粗く設定して, 前述の同定手法を適用し, 最終的には, Case4に示す探索刻み幅を与

表5 流出モデルIのモデル定数(益田開拓農地造成域)

モデル定数	標準的定数	計算1	計算2	計算3	計算4	計算5	計算6
a_1 (mm ^{-2/3} h ⁻¹)	0.006	0.34	0.32	0.32	0.32	0.31	0.32
a_2 (h ⁻¹)	0.05	0.43	0.45	0.43	0.46	0.46	0.50
a_3 (h ⁻¹)	0.01	0.054	0.052	0.047	0.047	0.048	0.049
a_4 (h ⁻¹)	0.002	0.0052	0.0042	0.0042	0.0032	0.0062	0.0032
a_5 (h ⁻¹)	0.0001	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0004	0.0003
b_1 (h ⁻¹)	0.06	0.076	0.039	0.026	0.022	0.017	0.016
b_2 (h ⁻¹)	0.008	0.009	0.013	0.016	0.016	0.016	0.016
b_3 (h ⁻¹)	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.005	0.013
Z_1 (mm)	30	6	6	6	6	6	6
Z_2 (mm)	80	20	50	80	100	130	150
Z_3 (mm)	20	20	20	20	20	20	20
J_{xs} (mm/h)	—	0.277	0.276	0.276	0.276	0.276	0.278
J_{re} (%)—(a)	—	16.6	15.3	15.3	15.7	15.5	16.5
J_{re} (%)—(b)	—	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.6
J_{re} (%)—(c)	—	13.2	13.5	13.5	13.5	13.5	13.7
t_{pc}	—	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00
t_{po}	—	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00	7:00
Q_{pc} (m ³ /s)	—	7.51	7.48	7.47	7.44	7.45	7.45
Q_{po} (m ³ /s)	—	8.17	8.17	8.17	8.17	8.17	8.17
t_L (min)	—	10	10	10	10	10	10
S_2 (mm)	79	30	36	40	42	43	46
f_1 (mm/h)	6.0	3.0	2.7	2.6	2.6	2.6	2.7
f_c (mm/h)	1.2	0.8	1.3	1.6	1.7	1.8	2.0
Q_{3M} (mm/h)	0.6	0.52	0.84	0.93	1.04	1.12	1.26
g_{1M} (mm/h)	0.6	0.27	0.47	0.64	0.67	0.69	0.73
g_{1M}/f_c (mm/h)	0.52	0.34	0.36	0.41	0.39	0.38	0.37

表6 流出モデルIIのモデル定数
(益田開拓農地造成域)

モデル定数	標準的定数	計算7	計算8
$a_s(\text{mm}^{-2/3}\text{h}^{-1})$	—	1.18	1.23
$a_1(\text{mm}^{-2/3}\text{h}^{-1})$	0.006	0.31	0.24
$a_2(\text{h}^{-1})$	0.05	0.57	0.11
$a_3(\text{h}^{-1})$	0.01	0.101	0.016
$a_4(\text{h}^{-1})$	0.002	0.001	0.005
$a_5(\text{h}^{-1})$	0.0001	0.0002	0.0003
$b_s(\text{h}^{-1})$	—	0.05	0.043
$b_0(\text{h}^{-1})$	—	0.09	0.057
$b_1(\text{h}^{-1})$	0.06	0.11	0.023
$b_2(\text{h}^{-1})$	0.008	0.075	0.023
$b_3(\text{h}^{-1})$	0.002	0.075	0.023
$Z_s(\text{mm})$	—	7.3	10.9
$Z_{11}(\text{mm})$	—	2	1
$Z_{12}(\text{mm})$	30	41	54
$Z_2(\text{mm})$	80	79	81
$Z_3(\text{mm})$	20	20	20
$J_{xs}(\text{mm/h})$	—	0.266	0.250
$J_{re}(\%) - (a)$	—	19	16.1
$J_{re}(\%) - (b)$	—	14.9	13.7
$J_{re}(\%) - (c)$	—	12.8	12.3
t_{pc}	—	7:00	7:00
t_{po}	—	7:00	7:00
$Q_{pc}(\text{m}^3/\text{s})$	—	8.08	8.06
$Q_{po}(\text{m}^3/\text{s})$	—	8.17	8.17
$t_l(\text{min})$	—	10	10
$S_u(\text{mm})$	79	45	43
$f_u(\text{mm/h})$	6.0	10.9	2.3
$f_c(\text{mm/h})$	1.2	5.9	1.3
$Q_{3M}(\text{mm/h})$	0.6	2.54	0.36
$g_{1M}(\text{mm/h})$	0.6	3.39	0.98
$g_{1M}/f_c(\text{mm/h})$	0.52	0.57	0.73

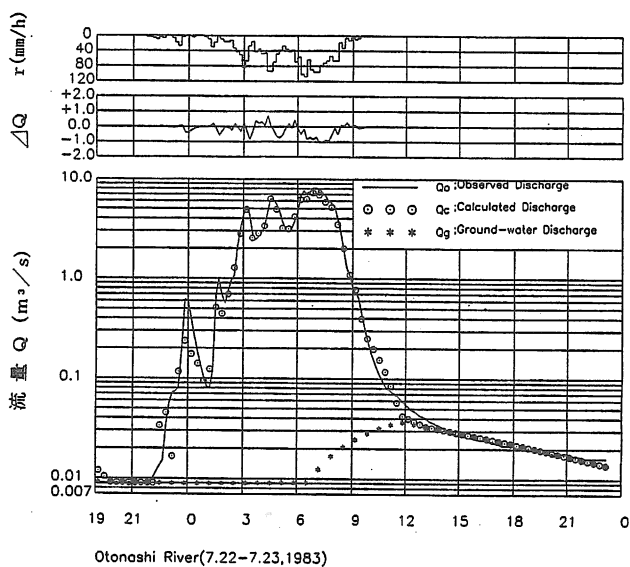


図4 流出解析事例 (流出モデルI, 計算3)

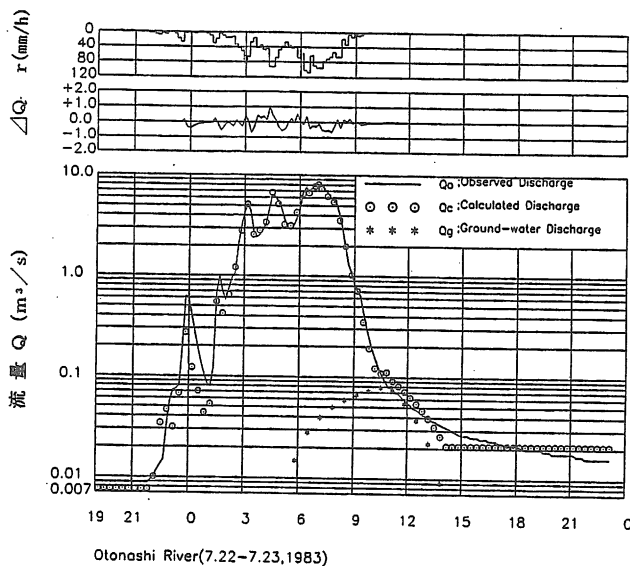


図5 流出解析事例 (流出モデルII, 計算7)

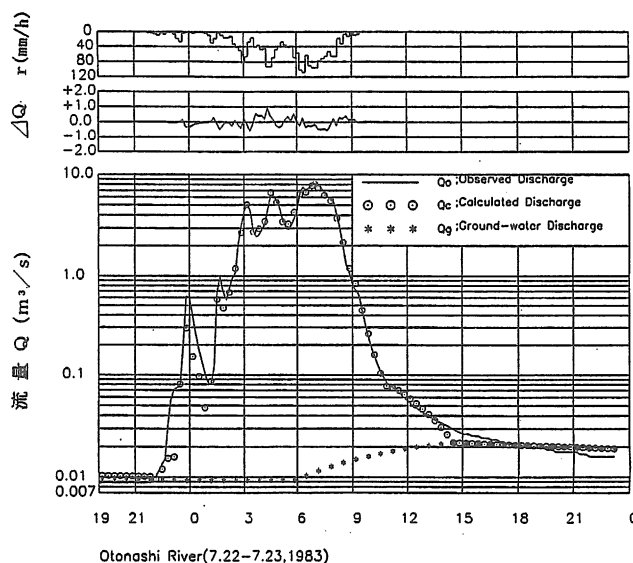


図6 流出解析事例 (流出モデルII, 計算8)

えて流出モデルを同定した。流出モデルⅡ（流域内の不浸透面積率の影響を組込んだLST-Ⅱモデルの応用モデルLST-Ⅱモデル）では、表3のCase5に示すモデル定数の探索刻み幅を与えてモデルの同定を行った。また、流出モデルⅢ（集中定数型KiWSモデル）では、LST-Ⅱモデルのモデル定数との対応関係を考慮して、設定した。

表5は流出モデルⅠ、すなわちLST-Ⅱモデルの同定例を示し、モデル定数 Z_2 、 Z_3 を一定値（ $Z_2=20, 50, \dots, 150$ 、 $Z_3=20$ ）として、他のモデル定数を最適同定した計算1～6までの6ケースの解析結果である。同表の第2欄には、永井の研究成果¹⁾によるLST-Ⅱモデルの標準的定数が記載してある。このLST-Ⅱモデルの標準的定数は流域面積21.6～1,717km²の山地8流域を対象にした解析結果から得られたものであるが、計算1～6のいずれにおいてもモデル定数 a_1 、 a_2 の値がこの標準的定数と大きく異なった結果となっている。これは、自然丘陵林地表層部が改変された農地造成域と山地流域における表面流出及び早い中間流出に相当する流出成分の生起特性の差異及び流域スケールと関連する要素に基づくものと考えられる。また、同表の下段に示すLST-Ⅱモデルのモデル特性値 S_u 、 f_u 、 f_c 、 \dots 、 g_{1M}/f_c 等のうち、流域表層部の差異が反映する S_u 、 f_u の値がLST-Ⅱモデルの標準的定数の値と異なった結果となっている。図4に、計算3に示すモデル定数による観測ハイドログラフの再現例を示すが、解析結果はほぼ良好といえる。表6は、流出モデルⅡによる同定結果を示す。また図5、6はそれぞれ表6の計算7、8で同定されたモデル定数による観測ハイドログラフの再現性を示したものである。流出モデルⅡについては表6の計算7よりも計算8による解析が良好な結果を与えている。また表4には流出モデルⅢによる同定結果を斐伊川流域の3集水域での同定結果と併示する。ピーク部の再現性が流出モデルⅠ及び流出モデルⅡに比較して劣っており農地造成域を対象に

本流出モデルを適用するに際しなお検討の余地があるといえる。

平均斜面長138mとする本流域の流域モデルに対し表6、4に示すように表面流出成分を規定する流出モデルⅡのモデル定数 $a_0 \approx 1.2$ (mm^{-2/3}h⁻¹) 並びに流出モデルⅢのモデル定数 a_1 (表面流モデルの斜面流定数 k と等価) ≈ 1.9 (m^{-1/6}s^{3/5}) という値が得られた。

あ と が き

SP法の適用に際し、オーダーの異なる各流出モデル定数の有効桁を設定し、一定の刻み幅でモデル定数を探索する手法を農地造成域の出水に適用した結果、流出モデルの探索効率の面で幾分改良できた。しかしピーク流出部及びハイドログラフの再現性の評価基準のほかに別途各流出モデル定数の物理的評価基準ないし流域面積との関連での評価スケールの設定が必要と思われる。これらについては今後の検討課題としたい。

引 用 文 献

- 1) 角屋 睦・永井明博：流出解析法（その12）—タンクモデルとSP法による最適同定，農土学会誌，48(12)，pp.51-59(1980)
- 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) 福島 晟：分布型流域モデルを組み込んだ流出解析法の検討，島根大学農学部研究報告，26，pp.45-53(1992)
- 4) 田中丸治哉：タンクモデル定数の大域的探索，農業土木学会論文集，178，pp.103-112(1995)
- 5) 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)