

流域の部分的開発及び造成畑地の特性を考慮した集中定数型流出モデル

福島 辰・武田育郎・森 也寸志

A Lumped Parametric Runoff Model considered A Partially Development of Basin and Characteristics of Reclaimed Upland Field

Akira FUKUSHIMA, Ikuo TAKEDA and Yasushi MORI

Abstract The study purposes to develop a technique of runoff analysis evaluating the hydrological effects of partially development by land reclamation in a hilly area and considering the characteristics of soil moisture retention in the surface layer of a reclaimed upland field. Three types of runoff model are offered and these model are identified by using the observed hydrograph in the experimental basin. The outline is as follows:

(1) The first model is modified from the Long- and Short- Terms Runoff Model (LST-II model), which is called as a modified LST-II model. The land use effect caused by partial land reclamation in a hilly watershed is included in the model, i.e., the upper zone of first tank in the LST-II model is divided into two parts in the ratio of the area composed by a reclaimed upland field and a hilly area.

(2) The second one is a modification of the lumped kinematic wave storage model (KiWS model) which is originally combined the kinematic wave runoff model and the LST-II model.

(3) The third one is another modification of LST-II model, which considers retention characteristics of rainwater as soil moisture equivalent to field capacity in the surface layer of a reclaimed upland field.

(4) Runoff calculation system is constructed by using UNIX workstation, to carry out a series of analysis; and output of hydrographs.

(5) By applying the modified Standardized Powell method, these proposed runoff models are identified. And it is shown that the runoff analysis using the modified LST-II model and the modified lumped KiWS model improve slightly the reproducibility of the observed hydrograph.

Key word: Runoff model; runoff analysis; flood runoff

ま え が き

自然丘陵地流域の流出特性を吟味するための流出解析法については、ほぼ実用的レベルで満足すべき流出モデルが確立されているが、農地造成など流域内の部分的開発に伴って、流出モデル定数がどのように変化するかについての実用的手法については、なお検討の余地があると思われる。本報告では、まず集中定数型流出モデルを応用して、流域内の部分的開発の影響を考慮する流出

解析手法を提案する。

次いで、角屋・永井により開発提案されている長短期流出両用モデル¹⁾のモデル構造を活用して、造成畑地域の表層部の雨水保留特性を組入れた流出モデルの開発を試みる。すなわち、造成畑地域における流出特性を流出モデルを介して吟味する際、流出モデル構造ないしモデル定数が、畑地灌漑計画で常用されている24時間容量、生長阻害水分点、容易有効水分量、有効土層、制限土層等の概念との関連で議論できれば、畑地灌漑計画あるいは流出解析に向けてより有益な情報が提供できるも

のと考え、洪水流出と長期流出を連続して同時に解析できる特長を有している角屋・永井の長短期流出両用モデルを基礎にした造成畑地の貯留型流出モデルを提示する。

そして、ここで提示する流出モデルを、i)丘陵山林地の一部が改良山成畑工による造成畑地に開発された流域、ii)全域が改良山成畑工による造成畑地域である流域の2流域に適用した若干の検討結果について述べる。なお、畑地灌漑における有効雨量は、栽培作物の生育に直接有効な環境を保証する畑地土壌の保水性に関わる概念であるのに対し、雨水流出過程から眺めた場合には、対象流出成分に関与しない流域保留量とみなされることから、いずれの視点からの議論であるかを明確にしておく必要がある。ここでは、流出解析を意図した後者の視点による記述を行う。

1. 流出モデルの設定

流域の部分的開発の影響が加味できる集中定数型流出モデルとして、以下に示す流出モデルI、IIを設定する。すなわち、流域の開発に伴い、たとえば牧草地と丘陵林地、あるいは不浸透域と浸透域というように2種の地目から構成される地域を対象に流出解析が可能となるように、長短期流出両用モデル(LST-IIモデル)を応用した流出モデルI、あるいは集中定数型KiWSモデル²⁾を基礎とした流出モデルIIを考える。

また、長短期流出両用モデルを基礎にして、造成畑地表層土の雨水保留能を考慮した流出モデルIIIを考える。

流出モデルI :

図1に示す流出モデルIは、農地造成などの流域の部分的開発の効果、また開発流域にみられるような舗装道路面積や水路網の具備の効果、あるいは地表条件の面積的な分布の効果を考慮しうる流出モデルとしてLST-IIモデルを若干修正したモデル構造を有する³⁾。すなわち、流域の開発に伴い、たとえば牧草地と丘陵林地、あるいは不浸透域と浸透域というように2種の地目から構成される地域を対象に流出解析が可能となるように、流域の部分開発域あるいは不浸透域の面積割合を β_* として、LST-IIモデルの第1段タンク上層部を $\beta_* : (1 - \beta_*)$ の比で2分割している。

なお、農地造成地等での流出解析を想定し、図1に示すように、本流出モデルには凹地貯留 Z_s 、ないし Z_{11} が考慮されている。したがって、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流出計算基礎式は次のとおりである。

流出高 :

$$Q_s = a_s (S_s - Z_s)^m \quad (\text{for } S_s > Z_s) \quad \dots (1)$$

$$Q_1 = a_1 (S_{11} - Z_{11})^m \quad (\text{for } S_{11} > Z_{11}) \quad \dots (2)$$

$$Q_2 = a_2 S_{12} \quad \dots (3)$$

$$Q_3 = a_3 (S_2 - Z_3) \quad (\text{for } S_2 > Z_3) \quad \dots (4)$$

$$Q_4 = a_4 S_3 \quad \dots (5)$$

$$Q_5 = a_5 S_4 \quad \dots (6)$$

浸入能 :

$$f_s = b_s (Z_2 + Z_3 - S_2) \quad \dots (7)$$

$$f_0 = b_0 (Z_{12} - S_{12}) \quad \dots (8)$$

$$f_1 = b_1 (Z_2 + Z_3 - S_2) \quad \dots (9)$$

浸透高 :

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

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

連続の式 :

$$dS_s/dt = r_a - Q_s - f_s \quad \dots (12)$$

$$dS_{11}/dt = r_a - Q_1 - f_0 \quad \dots (13)$$

$$dS_{12}/dt = f_0 - Q_2 - f_1 \quad \dots (14)$$

$$dS_2/dt = \beta_* f_s + (1 - \beta_*) f_1 - Q_3 - g_1 \quad \dots (15)$$

$$dS_3/dt = g_1 - Q_4 - g_2 \quad \dots (16)$$

$$dS_4/dt = g_2 - Q_5 \quad \dots (17)$$

ここに、 Q_s :表面流出高 (mm/h)、 f_s 、 f_0 及び f_1 :浸入能 (mm/h) S_s 、 S_{11} 、 S_{12} :貯留量 (mm)、 Z_s 、 Z_{11} :流出孔の高さ (mm)、 a_s 、 b_s :定数、 $m=5/3$ である。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LST-IIモデルと同じである。

なお、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 (m^3/s)は次式から算定されることになる。

$$q = \beta_* Q_s + (1 - \beta_*) (Q_1 + Q_2) + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad \dots (18)$$

$$Q = q \cdot A / 3.6 \quad \dots (19)$$

ここに、 A :流域面積 (km^2)

流出モデルII :

流出モデルIIとして、図2に示す集中定数型KiWSモデル(Kinematic Wave Storage Model)を応用した流出モデルを考えることにする。集中定数型KiWSモデルは、雨水流モデルと長短期流出両用モデルを統合

したモデルである。すなわち、集中定数型 KiWS 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。また KiWS モデルは、分布型流出モデルとして開発したものであるが、図2では流域平均斜面長 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 モデルと略称する。図2に示す流出モデル定数 a_1, a_2 はそれぞれ表面流モデルの斜面流動数 k ($m^{-1/5} \cdot s^{3/5}$) 及び中間流モデルの定数 $k_i \cdot s / \lambda$ (cm/s) に対応している。

ここでは、流出モデルIIとして、図1に示す流出モデルIと同様に、集中定数型 KiWS モデルの第1段タンク上層部を2種の地目の面積比率 β_* : $(1 - \beta_*)$ で分割したモデル構造を設定する。そして、左側タンク部では、表面流出高 Q_s を表面流モデルにより、また右側タンク部からの流出高 Q_1, Q_2 は、表面流と早い中間流が混在する雨水流モデルにより算定するものとする。また、本流出モデルでは、図2に示す集中定数型 KiWS モデルのモデル定数に加えて、新たに、雨水流モデルの斜面流動数に対応するモデル定数 a_s 、浸入能を規定するモ

デル定数 b_s 、及び流出孔の高さ Z_s を導入することになる。左側タンク部の表面流出高 Q_s 、及び右側タンク部からの流出高 Q_1, Q_2 を算定する際に必要な有効雨量は、集中定数型 KiWS モデルと同じ手法で算定するものとする。これによって、各地目それぞれの特性を反映した流出モデル定数を設定・評価することが可能となり、左側タンク部の表面流出高 Q_s 及び右側タンク部からの流出高 Q_1, Q_2 に寄与する2つの有効雨量系列が自動的に算定できる。

流出モデルIII :

畑地灌漑計画では、24時間容水量と生長阻害水分点の間の土壌水分量は容易有効水分量と定義され、作物の正常生育に有効な範囲とし、制限土層内の水管理が行われる。わが国の火山灰土で容易有効水分量は20%（容積比）付近、砂丘土で数%、一般の鉾質土はこの中間値を示すとされている。また、圃場容水量は毛管水の上限で、大量の降雨や灌漑の後、重力水が深層へ浸透し去り、土壌が重力に逆らって保持しうる最大の水分量とされている。そして、畑地灌漑では24時間容水量を圃場容水量の代用としている。そこで、造成畑地における雨水流出過程において、この24時間容水量と等価な表層土壌の保水量ないし流域表層部の雨水保留量を流出モデルに組み入れることとする。ここでは、長短期流出両用モデルとして確立している角屋・永井の長短期流出両用モデルLST-IIのモデル構造を基本にした流出モデルを

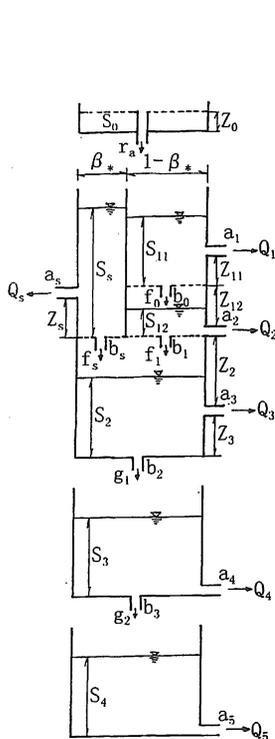


図1 流出モデル I

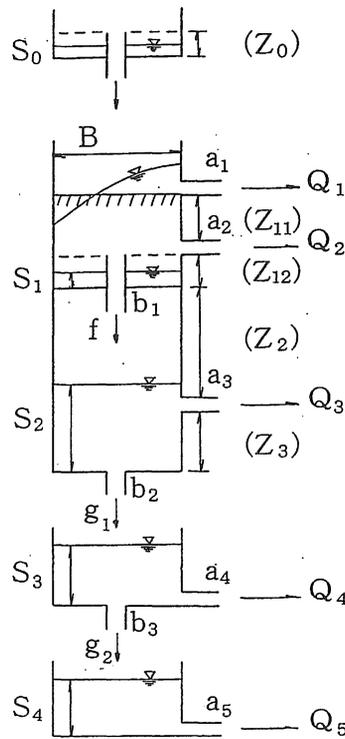


図2 集中定数型 Kiws モデル

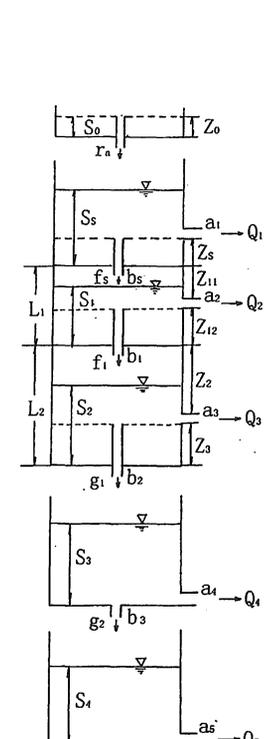


図3 流出モデルIII

考える。

一般に、流域表層部の土層はその堆積環境に応じた層構造を有しているが、ここでは流域表層部が上下2層からなる成層構造を形成しているものとしたモデル化を行う。すなわち、図3に示す流出モデルⅢを設定する。図中で L_1 、 L_2 は、それぞれ流域表層部の上下2層における最大雨水保留量を水深に換算した土層厚さを示し、次式の関係が近似的に成立するものとする。

$$L_1 = Z_{11} + Z_{12} = \alpha \theta_{SU} \cdot D_1 / 100 \quad \dots(20)$$

$$Z_{12} = \theta_{FU} \cdot D_1 / 100 \quad \dots(21)$$

$$L_2 = Z_2 + Z_3 = \alpha' \theta_{SL} \cdot D_2 / 100 \quad \dots(22)$$

$$Z_3 = \theta_{FL} \cdot D_2 / 100 \quad \dots(23)$$

ここに、 D_1 、 D_2 ：表層土の上部及び下部それぞれの土層厚さ (mm)、 θ_{SU} 、 θ_{SL} ：表層土の上部及び下部それぞれの飽和水分量 (容積含水率, %)、 θ_{FU} 、 θ_{FL} ：表層土の上部及び下部それぞれの24時間容水量 (容積含水率, %)、 Z_{11} 、 Z_{12} 、 Z_2 、 Z_3 ：流出孔の高さ (mm)、 α 、 α' ：定数である。その他の記号は長短期流出両用モデルLST-IIと同一とする。ただし、ここでは、流域地表面における窪地貯留高 Z_s 、浸入能 f_s の導入、及び浸透高 g_1 の算定式がLST-IIモデルと異なっている。

図3に示す流出モデルⅢによる流出高、浸入能、浸透高及び各タンクの連続の式は以下のように表される。

流出高：

$$Q_1 = a_1 (S_s - Z_s)^m \quad (\text{for } S_s > Z_s) \quad \dots(24)$$

$$Q_2 = a_2 (S_1 - Z_{12}) \quad (\text{for } S_1 > Z_{12}) \quad \dots(25)$$

$$Q_3 = a_3 (S_2 - Z_3) \quad (\text{for } S_2 > Z_3) \quad \dots(26)$$

$$Q_4 = a_4 S_3 \quad \dots(27)$$

$$Q_5 = a_5 S_4 \quad \dots(28)$$

浸入能：

$$f_s = b_s (Z_{11} + Z_{12} - S_1) \quad (\text{for } S_s > Z_s) \quad \dots(29)$$

$$f_1 = b_1 (Z_2 + Z_3 - S_2) \quad (\text{for } S_1 > Z_{12}) \quad \dots(30)$$

浸透高：

$$g_1 = b_2 (S_2 - Z_3) \quad (\text{for } S_2 > Z_3) \quad \dots(31)$$

$$g_2 = b_3 S_3 \quad \dots(32)$$

連続の式：

$$dS_s/dt = r_a - Q_1 - f_s \quad \dots(33)$$

$$dS_1/dt = f_s - Q_2 - f_1 \quad \dots(34)$$

$$dS_2/dt = f_1 - Q_3 - g_1 \quad \dots(35)$$

$$dS_3/dt = g_1 - Q_4 - g_2 \quad \dots(36)$$

$$dS_4/dt = g_2 - Q_5 \quad \dots(37)$$

ここに、 $Q_1 \sim Q_5$ ：流出高(mm/h)、 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 は地下水流出を想定する。 $S_s \sim S_4$ ：貯留量(mm)、 $a_1 \sim a_5$

及び $b_s \sim b_3$ ：定数、 $Z_s \sim Z_3$ ：流出孔の高さ(mm)、 f_s 及び f_1 ：浸入能(mm/h)、 g_1 及び g_2 ：浸透高(mm/h)、 t ：時間である。

なお、貯留量 S_1 と流出孔の高さ Z_{12} 及び S_2 と Z_3 の大小関係の組み合わせは4ケース(① $S_1 > Z_{12}$ 、 $S_2 > Z_3$ 、② $S_1 \leq Z_{12}$ 、 $S_2 > Z_3$ 、③ $S_1 > Z_{12}$ 、 $S_2 \leq Z_3$ 、④ $S_1 \leq Z_{12}$ 、 $S_2 \leq Z_3$)ある。この内、① $S_s > Z_s$ 、 $S_1 > Z_{12}$ のケースで上層に f_s あるいは f_1 に見合うだけの十分な貯留量がある場合、浸入能 f_s 及び f_1 の時間的変化は、Hortnの浸入能式と同形の次式で与えられる。

$$f_s = f_{sc} + \gamma \cdot \exp(-ct) + (f_{s0} - f_{sc} - \gamma) \cdot \exp\{-(b_s + a_2)t\} \quad \dots(38)$$

$$f_1 = f_c + (f_0 - f_c) \cdot \exp(-ct) \quad \dots(39)$$

ここで、

$$f_{sc} = b_s (a_2 Z_{11} + f_c) / (b_s + a_2)$$

$$\gamma = (f_0 - f_c) / (b_s + a_2 - c)$$

$$f_c = b_1 Z_2 (a_3 + b_2) / c, \quad c = a_3 + b_1 + b_2,$$

f_{sc} 及び f_0 は、それぞれ $t=0$ のときの f_s 及び f_1 の値。

図3に示す流出モデルにおいて、浸入能 f_s の上限値 f_{sM} 、最終値 f_{sL} は、次式で与えられる。

$$f_{sM} = b_s (Z_{11} + Z_{12}) \quad \dots(40)$$

$$f_{sL} = f_{sc} = b_s (a_2 Z_{11} + f_c) / (b_s + a_2) \quad \dots(41)$$

また、浸入能 f_1 の上限値 f_{1M} 、最終値 f_{1L} は次式で与えられる。

$$f_{1M} = b_1 (Z_2 + Z_3) \quad \dots(42)$$

$$f_{1L} = f_c = b_1 Z_2 (a_3 + b_2) / c \quad \dots(43)$$

一方、貯留量 S_1 及び S_2 の上限値 S_{1M} 、 S_{2M} は次式で与えられる。

$$S_{1M} = (f_{sM} - f_{sL}) / b_s \quad \dots(44)$$

$$S_{2M} = (f_{1M} - f_{1L}) / b_1 \quad \dots(45)$$

そして、この S_{1M} 、 S_{2M} を用いると、 Q_2 、 Q_3 、 g_1 の最大値 Q_{2M} 、 Q_{3M} 、 g_{1M} は(46)~(48)式で与えられ、これらは f_{sL} 、 f_{1L} と(49)、(50)式の関係にある。

$$Q_{2M} = a_2 (S_{1M} - Z_{12}) \quad \dots(46)$$

$$Q_{3M} = a_3 (S_{2M} - Z_3) \quad \dots(47)$$

$$g_{1M} = b_2 (S_{2M} - Z_3) \quad \dots(48)$$

$$f_{sL} = Q_{2M} + f_{1L} \quad \dots(49)$$

$$f_{1L} = Q_{3M} + g_{1M} \quad \dots(50)$$

なお、図3の最上段のタンクは、LST-IIモデルで採用されている樹木等による降雨遮断タンクを意味している。また流域からの蒸発散量はLST-IIモデルでの算定方式を用い、実際の流出計算においては、各段タンクの連続的に蒸発散に伴う貯留量の減少強度を組み込むこと

とする。

2. モデル定数の探索手法

前述の各流出モデルにおいて、最上段の降雨遮断タンクのモデル定数を除外しても、探索すべきモデル定数は流出モデルⅠ、Ⅱ、Ⅲそれぞれ23, 21, 19となる。

各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)⁴⁾を適用する。

モデル定数の最適値探索に際しての評価基準として、次式に示す χ^2 基準を採用する。

$$J_{XS} = \frac{1}{M_D} \sum \frac{(Q_{ci} - Q_{oi})}{Q_{oi}} \quad Q_{oi} \geq Q_* \quad \dots(51)$$

ここに、 J_{XS} ：評価基準(mm/h)、 Q_{ci} ：計算流出高(mm/h)、 Q_{oi} ：観測流出高(mm/h)、 M_D ：データ数、 Q_* ：評価基準流出高(mm/h)。

さらに、次式で表される相対誤差(%)も計算し、併示することにする。

$$J_{RE} = \frac{1}{M_D} \sum \frac{(Q_{ci} - Q_{oi})}{Q_{oi}} \quad Q_{oi} \geq Q_* \quad \dots(52)$$

SP法を適用して各流出モデルを同定する際、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。このため、この局所的極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。そこで、モデル定数の有効桁に配慮して繰り返し流出計算が進められるように、SP法において定義されている基準化変数 x_1, x_2, \dots, x_n に対応する新たな変数 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 を探索することとする⁵⁾。

$$a_1 = a_{10} + \Delta a_1 M_1, a_2 = a_{20} + \Delta a_2 M_2, \dots, a_n = a_{n0} + \Delta a_n M_n \quad \dots(53)$$

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。

3. 適用例

島根県益田市に設定した2つの試験流域における水文観測資料に基づき、前項2.で述べた各流出モデルを同

表1 解析対象流域と解析対象出水

出水名	流域名	地点	流域面積 (km ²)	出水年月	ピーク流量 (m ³ /s)
出水A	内田試験流域	市原	0.107	1980.8	1.24
出水B	益田開拓農地造成域	防災ダム	0.296	1997.9	1.40
出水C	益田開拓農地造成域	防災ダム	0.296	1999.6	4.32

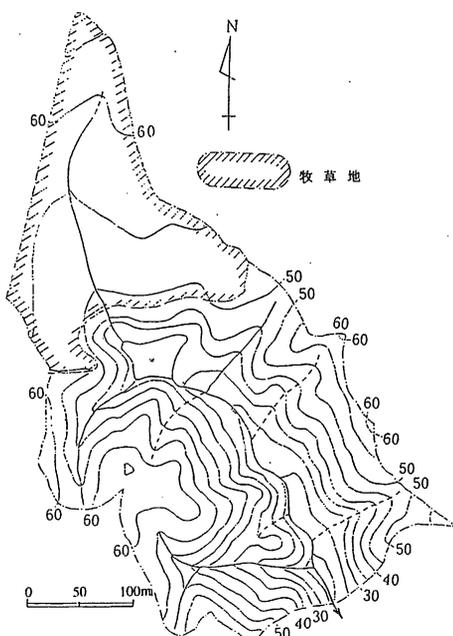


図4 内田試験流域の概要

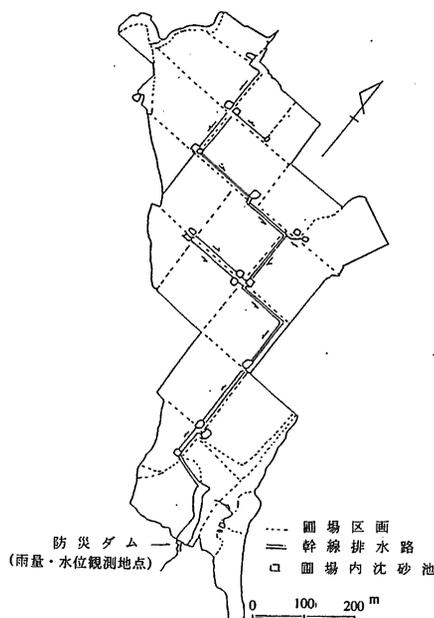


図5 音無川試験流域の概要

定することとする。ここでは、表1に示す出水 A, B, C の3出水を利用して流出モデルを同定する。出水 A は、図4に示す内田流域で観測された出水である。また出水 B, C は、図5に示す益田開拓農地造成域内の音無川試験流域における観測出水である。なお、水文観測時点において内田流域は、図4に示すように上流域の約1/3が牧草地として開発されており、残りの下流部は丘陵林地であった。また、音無川試験流域は図5に示すように全域とも改良山成畑工による農地造成域である。

以下、流出モデル I 及び流出モデル II は出水 A で同定した結果を、流出モデル III は出水 B, C で同定した結果を述べる。また、LST-II モデルあるいは集中定数型 KiWS モデルの同定結果も併示することとする。

なお、流出解析は FORTRAN77 による計算プログラムを UNIX ワークステーションを利用して開発し、またいずれの流出モデルにおいても流出計算単位時間は10分として実行した。

流出モデル I 及び流出モデル II の適用例：

流出モデル I では、永井の研究成果による LST-II モデルの標準的定数（表2, 4, 5の第2欄に示す値⁶⁾）をモデル定数探索の際の初期値として、活用することとする。またモデル定数の探索刻み幅は、 $\Delta a_s, \Delta a_1, \Delta a_2, \Delta b_1$ を 0.01, $\Delta a_3, \Delta b_s, \Delta b_0, \Delta b_2, \Delta b_3$ を 0.001, Δa_4 を 0.0001 を、 Δa_5 を 0.00001, $\Delta Z_{11}, \Delta Z_{12}$ を 1.0, $\Delta Z_2, \Delta Z_3$ を 5.0 とした。

一方、流出モデル II 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。

出水 A に対して、流出モデル I を同定した結果、表2に示すようなモデル定数が得られた。同表には、LST-II モデルを適用して得られたモデル定数が、永井の研究成果による LST-II モデルの標準的定数とともに併示してある。両流出モデルとも、計算ピーク流量の値は観測値と比較して、約12~15%程度過少評価されているものの、観測ハイドログラフの再現性は相対誤差で10~7%と良好である。ただし、流出モデル I では、上流域1/3が牧草地、残りの下流域が丘陵林地である内田流域の土地利用形態の特性を反映したモデル定数が推定されている利点を有しているといえる。

表3は、出水 A を用いて同定した流出モデル II のモデル定数を集中定数型 KiWS モデルの同定結果と併示したものである。また、図6は流出モデル II による計算ハイドログラフを観測ハイドログラフと比較したものである。計算ピーク流量は7%程度やや過少評価されているものの、ハイドログラフの再現性は、前述の流出モデ

ル I による結果と比較して、僅かに良好な傾向にある。また、流出モデル II のモデル定数 a_s, a_1 は、表面流モデルの斜面流動定数 k に対応する定数で、本解析例では a_s は牧草地、 a_1 は丘陵林地における値である。表3の第3欄に示すように、牧草地のモデル定数 $a_s=1.5$ ($m^{-1/5} \cdot s^{3/5}$)、丘陵林地のモデル定数 $a_1=2.7$ ($m^{-1/5} \cdot s^{3/5}$) と評価されている。これに対し、流域一様な斜面流動定数として評価することになる集中定数型 KiWS モデルでは、 $a_1=1.9$ ($m^{-1/5} \cdot s^{3/5}$) と算定されている。なお、流出モデル II の第1段タンク上層部の分割割合を示す定数 β_s は 0.31 と算定されている。

また、図7は流出モデル II により算定された牧草地及び丘陵林地それぞれの有効雨量系列から、雨水保留量曲線及び累加雨量~累加有効雨量曲線を図示したものである。同図に示すように、総雨量 $R=178.5$ mm に対し、牧草地では、総有効雨量 $R_s=50.0$ mm、雨水保留量 $F_s=128.5$ mm となっている。一方、丘陵林地では、総有効雨量 $R_c=35.2$ mm、雨水保留量 $F=143.3$ mm と算定されている。最適同定すべきモデル定数の数は集中定数型 KiWS モデルの16に対し、流出モデル II は21と5個多くなるが、このように、流出モデル II では、2種の地目に応じたモデル定数 $a_s, a_1, b_s, b_1, Z_s, Z_{11}$ 等の値及び有効雨量系列が自動的に算定される有利さを持っている。

表2 LST-II モデル及び流出モデル I のモデル定数 (出水 A)

モデル定数	標準的定数	LST-II モデル	流出モデル I
a_s ($mm^{-2/5} h^{-1}$)	-	-	0.28
a_1 ($mm^{-2/5} h^{-1}$)	0.006	0.10	0.06
a_2 (h^{-1})	0.05	0.42	0.49
a_3 (h^{-1})	0.01	0.102	0.128
a_4 (h^{-1})	0.002	0.0088	0.0073
a_5 (h^{-1})	0.0001	0.0002	0.0002
b_s (h^{-1})	-	-	0.05
b_0 (h^{-1})	-	-	0.37
b_1 (h^{-1})	0.06	0.11	0.10
b_2 (h^{-1})	0.008	0.069	0.062
b_3 (h^{-1})	0.002	0.02	0.019
Z_0 (mm)	-	2	2
Z_s (mm)	-	-	29
Z_{11} (mm)	-	11	0
Z_{12} (mm)	30	0	8
Z_2 (mm)	80	80	80
Z_3 (mm)	20	20	20
J_{xs} (mm/h)	-	0.065	0.043
J_{RE} (%), $Q_s=0$ mm/h	-	10.0	7.1
J_{RE} (%), $Q_s=1$ mm/h	-	8.9	6.8
J_{RE} (%), $Q_s=3$ mm/h	-	8.5	7.0
J_{RE} (%), $Q_s=5$ mm/h	-	8.1	7.1
t_{pc}	-	22:40	22:40
t_{po}	-	22:40	22:40
Q_{pc} (m^3/s)	-	1.09	1.06
Q_{po} (m^3/s)	-	1.24	1.24
t_L (min)	-	0	0

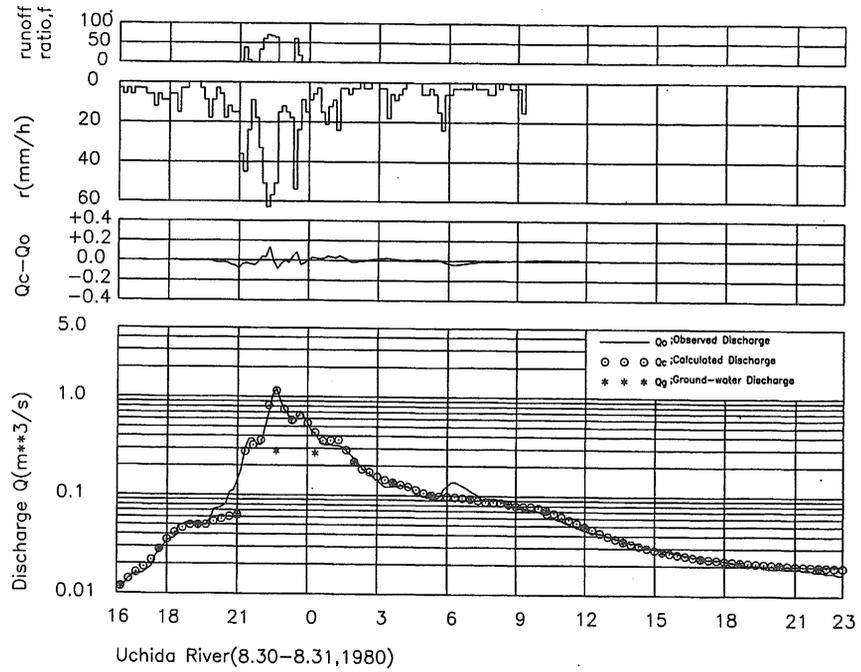


図6 流出モデルIIによる流出解析事例(出水A)

表3 集中定数型KiWSモデル及び流出モデルIIのモデル定数(出水A)

モデル定数	集中定数型KiWSモデル	流出モデルII
a_e ($m^{-1/5} s^{4/5}$)		1.5
a_1 ($m^{-1/5} s^{4/5}$)	1.9	2.7
a_2 (cm/s)	1.8	0.7
a_3 (cm/s)	0.1	0.13
a_4 (cm/s)	0.07	0.07
a_5 (cm/s)	0.004	0.04
b_e (cm/s)	-	0.6
b_1 (cm/s)	0.7	1.0
b_2 (cm/s)	0.29	0.32
b_3 (cm/s)	0.04	0.05
Z_0 (mm)	5	5
Z_e (mm)	-	3
Z_{i1} (mm)	8	7
Z_{i2} (mm)	5	5
Z_2 (mm)	80	80
Z_3 (mm)	20	20
J_{xs} (mm/h)	0.085	0.056
J_{RE} (%), $Q_e = 0$ mm/h	8.5	8.2
J_{RE} (%), $Q_e = 1$ mm/h	10.4	9.3
J_{RE} (%), $Q_e = 3$ mm/h	12.5	11
J_{RE} (%), $Q_e = 5$ mm/h	11.3	7.2
t_{pc}	22:40	22:40
t_{po}	22:40	22:40
Q_{pc} (m^3/s)	1.34	1.15
Q_{po} (m^3/s)	1.24	1.24
B (m)	57	57

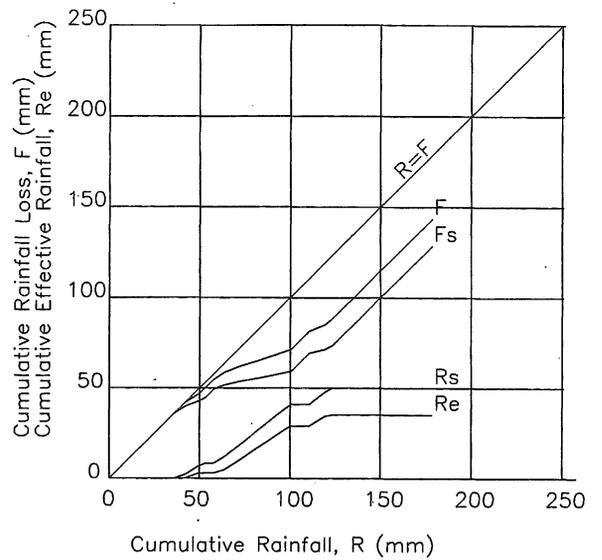


図7 保留量曲線及び累加有効雨量曲線(流出モデルII, 出水A)

表4 LST-IIモデル及び流出モデルⅢのモデル定数 (出水B)

モデル定数	標準的定数	LST-IIモデル	流出モデルⅢ
a_1 ($\text{mm}^{-2/3} \text{h}^{-1}$)	0.006	0.16	0.16
a_2 (h^{-1})	0.05	0.028	0.04
a_3 (h^{-1})	0.01	0.002	0.001
a_4 (h^{-1})	0.002	0.0003	0.0003
a_5 (h^{-1})	0.0001	0.0001	0
b_6 (h^{-1})	-	-	0.055
b_1 (h^{-1})	0.06	0.027	0.027
b_2 (h^{-1})	0.008	0.027	0.027
b_3 (h^{-1})	0.002	0.022	0.027
Z_0 (mm)		2	2
Z_1 (mm)	-	-	6
Z_{11} (mm)	-	14	17
Z_{12} (mm)	30	0	1
Z_2 (mm)	0	75	76
Z_3 (mm)	80	15	22
J_{XS} (mm/h)	20	0.101	0.047
J_{RE} (%), $Q_* = 0\text{mm/h}$	-	26.1	22.8
J_{RE} (%), $Q_* = 1\text{mm/h}$	-	37.1	18.4
J_{RE} (%), $Q_* = 3\text{mm/h}$	-	26.1	15.2
J_{RE} (%), $Q_* = 5\text{mm/h}$	-	2 : 24	16.7
t_{pc}	-	8 : 40	8 : 40
t_{po}	-	8 : 40	8 : 40
Q_{pc} (m^3/s)	-	1.5	1.37
Q_{po} (m^3/s)	-	1.4	1.4
t_L (min)	-	10	10

表5 LST-IIモデル及び流出モデルⅢのモデル定数 (出水C)

モデル定数	標準的定数	LST-IIモデル	流出モデルⅢ
a_1 ($\text{mm}^{-2/3} \text{h}^{-1}$)	0.006	0.14	0.15
a_2 (h^{-1})	0.05	0.078	0.23
a_3 (h^{-1})	0.01	0.019	0.053
a_4 (h^{-1})	0.002	0.0005	0.0005
a_5 (h^{-1})	0.0001	0.00019	0
b_6 (h^{-1})	-	-	0.19
b_1 (h^{-1})	0.06	0.056	0.15
b_2 (h^{-1})	0.008	0.04	0.15
b_3 (h^{-1})	0.002	0.04	0.025
Z_0 (mm)		2	2
Z_1 (mm)	-	-	20
Z_{11} (mm)	-	13	31
Z_{12} (mm)	30	0	9
Z_2 (mm)	0	80	44
Z_3 (mm)	80	20	16
J_{XS} (mm/h)	20	0.291	0.283
J_{RE} (%), $Q_* = 0\text{mm/h}$	-	24.3	27.2
J_{RE} (%), $Q_* = 1\text{mm/h}$	-	24.1	23.1
J_{RE} (%), $Q_* = 3\text{mm/h}$	-	25.6	26.0
J_{RE} (%), $Q_* = 5\text{mm/h}$	-	20.5	20.7
t_{pc}	-	14 : 00	14 : 00
t_{po}	-	14 : 00	14 : 00
Q_{pc} (m^3/s)	-	3.86	3.88
Q_{po} (m^3/s)	-	4.32	4.32
t_L (min)	-	0	0

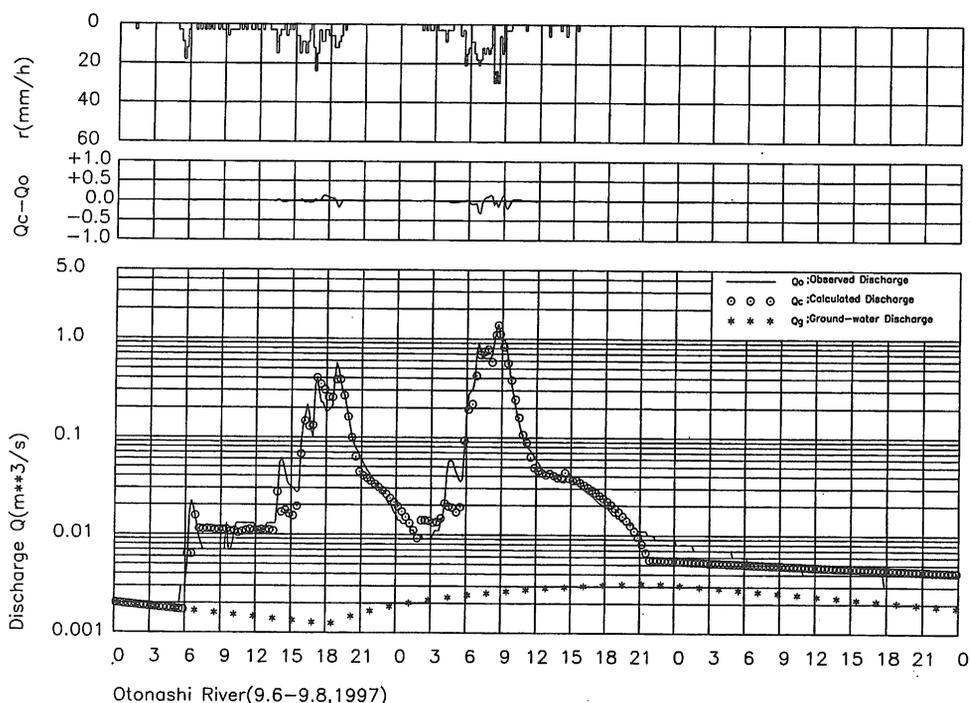


図8 流出モデルⅢによる流出解析事例 (出水B)

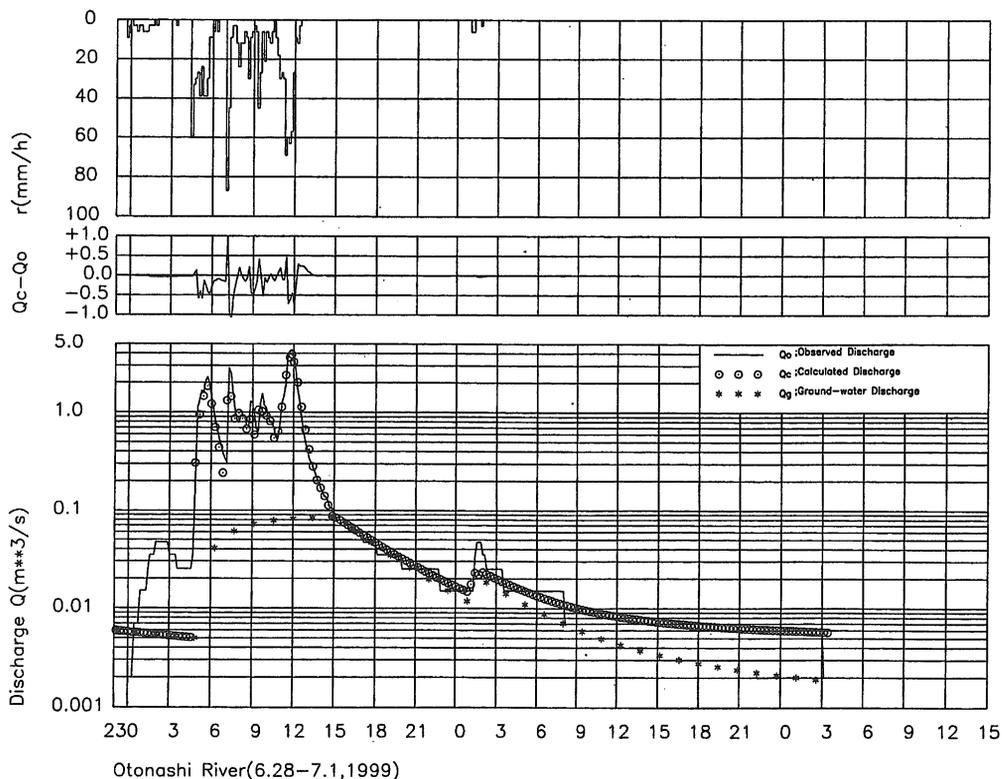


図9 流出モデルⅢによる流出解析事例（出水C）

表6 流出モデルⅢのモデル特性値

対象出水	出水B	出水C
S_{1M} (mm)	15.1	14.3
S_{2M} (mm)	59.3	34.7
f_{SM} (mm/h)	9.9	7.7
f_{SL} (mm/h)	1.6	5.0
f_{1M} (mm/h)	2.6	8.9
f_{1L} (mm/h)	1.0	3.7
Q_{2M} (mm/h)	0.6	1.2
Q_{3M} (mm/h)	0.04	1.0
g_{1M} (mm/h)	1.0	2.8
f_{1L}/f_{SL}	0.56	0.75
g_{1M}/f_{1L}	0.96	0.74

流出モデルⅢの適用例：

益田開拓農地造成域で1997年及び1999年に観測された表1に示す出水B、Cの2出水を利用して、流出モデルⅢの同定を試みた。出水Bは総降雨量127mm、観測ピーク流量1.40(m³/s)（ピーク流出高17mm/h）、出水Cは総降雨量208mm、観測ピーク流量(4.32 m³/s)（ピーク流出高53mm/h）である。

まず、出水B、Cで最適同定された流出モデルⅢのモデル定数を表4、5に示す。これらの表には、LST-IIモデルの同定結果も併示してある。また、観測ハイドログラフの再現性を図8、9に示す。出水B、Cそれぞれの計算ピーク流量は1.37、3.88(m³/s)とやや過少評価の傾

向にあり、また観測ハイドログラフの再現性は相対誤差で出水B、Cでそれぞれ23%、27%となっている。なお、出水Bでは、遅れ時間10分を導入した解析で最適値が探索できたのに対し、出水Cでは遅れ時間の導入の必要はなかった。出水Cのハイドログラフ立ち上がり部の再現性には、なお改良の余地があるが、いずれの出水でもみられる複峰型の流出波形部分の再現性はかなり良好と判断される。

最適同定すべきモデル定数の数はLST-IIモデルの15に対し、流出モデルⅢは19と4個多くなることも起因して、流出モデルⅢによる観測ハイドログラフの再現性は、LST-IIモデルに比較してやや改善される傾向にあるといえるが、モデル定数の最適評価については、なお検討の余地がある。たとえば、(40)~(48)式から算定された流出モデルⅢのモデル特性値が、表6に示すように出水規模により異なることになり、実用的な流出解析の目的からは好ましくないといえる。今後、本流出モデル定数の評価の際に、現地踏査に基づく流域表層部の保水特性に関する土壌水文学的考察を加味するとともに、出水規模と流域特性の関連で遅れ時間の導入をも考慮した解析法を検討する必要があると思われる。

あ と が き

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用いながら、牧草地と丘陵林地のような2種の地目から構成される流域を対象に、集中定数型流出モデルの同定が可能となった。

益田開拓農地造成域における中小出水を対象に、本報告で提示した流出モデルの適用性が認められたものの、今後は出水規模の影響、圃場の土壤水分定数及び水分特性曲線とモデル定数との対比などを踏まえたより詳細な検討が必要など問題が残されたといえる。

なお、本研究の一部は、文部省科学研究費補助金（基盤研究(B)(2)、課題番号 08456118）の補助を受けたことを付記し、謝意を表す。

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) 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)
- 3) 福島 晟・武田育郎・森 也寸志：不浸透面積率を考慮した長短期流出両用モデルによる流出解析，島根大学生物資源科学部研究報告，1，pp.51-56 (1996)
- 4) 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)
- 5) 福島 晟・武田育郎・森 也寸志：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，島根大学生物資源科学部研究報告，3，pp.19-26 (1998)
- 6) 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)