

山地小流域への長短期流出両用モデルの適用

浦野, 浩一
九州大学大学院生物資源環境科学府

四ヶ所, 四男美
九州大学名誉教授

平松, 和昭
九州大学大学院農学研究院

森, 牧人
九州大学大学院農学研究院

<https://doi.org/10.15017/4360>

出版情報：九州大学大学院農学研究院学芸雑誌. 60 (2), pp.165-172, 2005-10-01. 九州大学大学院農学
研究院

バージョン：

権利関係：

山地小流域への長短期流出両用モデルの適用

浦野 浩一¹・四ヶ所 四男美²
平松 和昭*・森 牧人

九州大学大学院農学研究生産環境科学部門地域環境科学講座水環境学研究室
(2005年6月30日受付, 2005年7月26日受理)

Applicability of the Long- and Short-Term Runoff Model in a Small Mountainous Basin

Kouichi URANO¹, Shiomi SHIKASHO², Kazuaki HIRAMATSU*
and Makito MORI

Laboratory of Drainage and Water Environment, Division of Regional Environment Science,
Department of Bioproduction Environmental Sciences, Faculty of Agriculture,
Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

序 論

代表的な流出解析法には、洪水流出解析法と長期流出解析法がある。今日では、それらについていくつかの有用なモデルが提案・改良された結果、実用上十分な予測精度が得られる域まで達していると言える。しかし細部においては、洪水流出解析法では有効降雨の推定法に問題があり、長期流出解析法では日流出高をうまく推定できても流出波形の再現性が必ずしも充分ではない、という欠点も残されている。洪水時の有効降雨が流域表層の乾湿状態と密接に関係していることを考慮し、長期流出解析結果からこれを推定する方法も考えられるが、両者を別々に扱うのは合理的ではない。

そこで提案されたのが、タンクモデル、補給能モデルなどの長期流出モデル、および表面流出モデル、貯留関数モデルなどの洪水流出モデルの両特性を有した長短期流出両用モデルである。このモデルは有効降雨を内部で算定する機能を持ち、洪水と低水を同時に連

続して解析できる特長がある。

本研究では、山地小流域の流出解析における本モデルの適用可能性を検証するとともに、長短期流出解析法の一つである TOPMODEL (田齊ら, 2004) による解析結果と比較し、両モデルの特徴を考察した。

データと方法

1. 研究対象流域

解析には、福岡市の東方約15kmの地点に位置する九州大学農学部附属福岡演習林内に設置された御手洗水試験流域(図1)の観測資料を使用した。流域面積0.095km²、河道長265mの山地小流域である。

この流域の基岩の大部分は三郡変成岩を構成する緑泥片岩より成り、さらに基岩の上部に存在する表層土壌は黄褐色森林土壌より成り立っている。また、この流域の植生は河道に沿った低位部ではヒノキ林で、また中腹から尾根に至る中・高位部ではカシ、マツ類を中心とした雑木林で被われており、これらの流域面積に占める割合は、それぞれ35%および65%である。

¹九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学専攻地域環境科学講座水環境学研究室

²九州大学名誉教授

Laboratory of Drainage and Water Environment, Division of Regional Environment Science, Department of Bioproduction Environmental Sciences, Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental Sciences, Kyushu University

*Professor Emeritus, Kyushu University

*Corresponding author (E-mail: hiramatsu@bpes.kyushu-u.ac.jp)

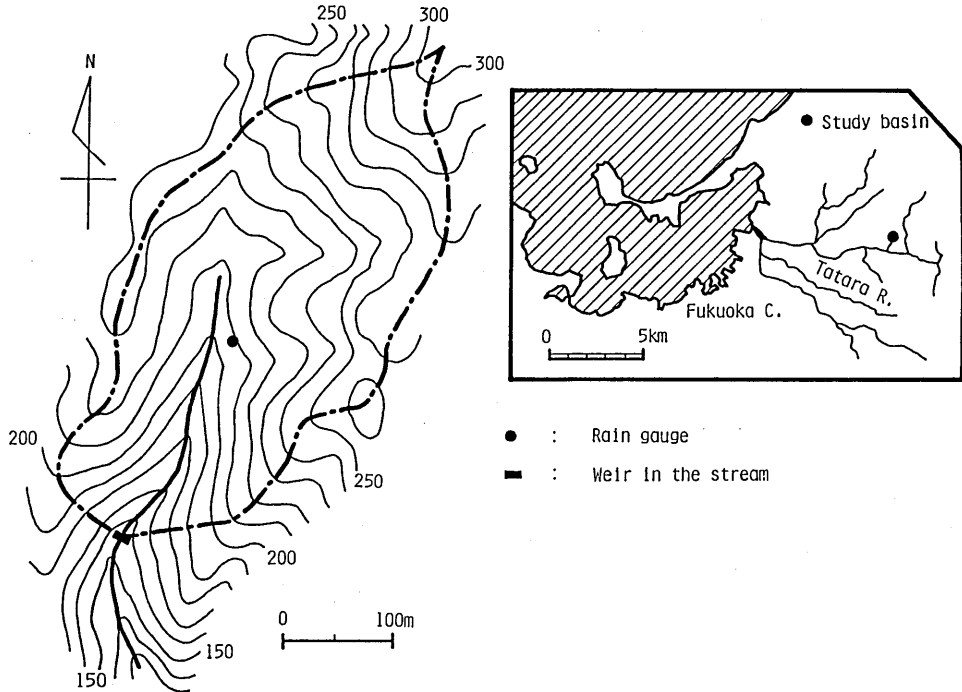


図1 御手洗水試験流域.

研究対象資料として、1983年の6月から9月までの10分間隔で観測された降雨量および流量データを用いた。この時期は降雨量・蒸発散量が多く、長短期の流出解析に適しているからである。

2. 長短期流出両用モデル

(1) 基礎式

このモデル(永井ら, 2003)は、図2に示すように3段のタンクで構成され、1段目は上層と下層に分かれている。各タンクの連続式は次式である。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS_1}{dt} &= r - E_1 - f - Q_1 - Q_2 \\ \frac{dS_2}{dt} &= f - Q_3 - g_1 \\ \frac{dS_3}{dt} &= g_1 - E_2 - Q_4 - g_2 \\ \frac{dS_4}{dt} &= g_2 - E_3 - Q_5 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $S_1 \sim S_4$ は貯留量、 t は時間、 r は流域平均降水量、 f は浸入強度、 g_1, g_2 は下段タンクへの供給強度、 $Q_1 \sim Q_5$ は流出量(強度)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 は地下水流出をそれぞれ想定している。また、 E_1, E_2, E_3 は各タンクからの蒸発散強度である。地下水流出を2段

で表現することで、低水の低減状況の再現性が改善されている。

Q, g は、貯留量が孔の高さ Z を超える場合にのみ流出があるものとして、次式から求める。

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= a_1(S_1 - Z_1)^m, \quad m = 5/3 \\ Q_2 &= a_2 S_1 \\ Q_3 &= a_3(S_2 - Z_3) \\ Q_4 &= a_4 S_3 \\ Q_5 &= a_5 S_4 \\ g_1 &= b_2 S_2 \\ g_2 &= b_3 S_3 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $a_1 \sim a_5$ および b_2, b_3 は流出係数、 $Z_1 \sim Z_3$ は流出孔高である。表面流はManning則に従うものとして $m = 5/3$ を採用している。速い中間流を表す式から表面流発生流量は $a_2 S_1$ となるが、この式は $S_1 > Z_1$ の場合にも適用する。河川流量 Q は、これらの流出成分の和として次式で表す。

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (3)$$

地表から下層への雨水の浸入は、最上段タンクの破線で表されているところで起こる。これには特別のルールが設けられており、浸入能 f は

$$f = b_1(Z_2 + Z_3 - S_2) \quad (4)$$

のように下層の空容量に比例するものと約束されてい

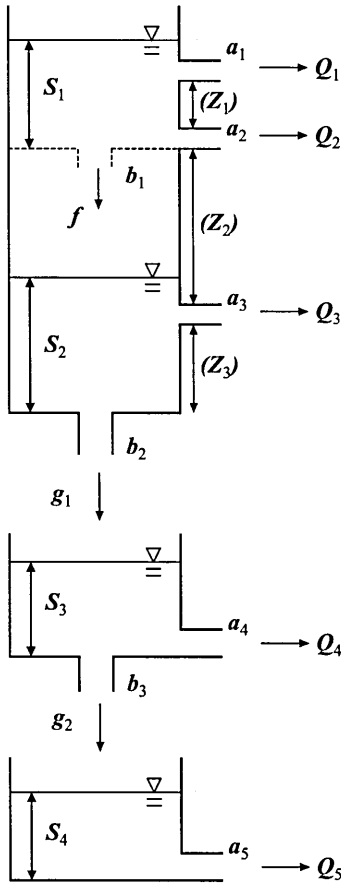


図2 長短期流出両用モデル.

る。ここに、 b_1 は定数である。この仮定は補給能モデルの扱いと同一であり、上層に f に見合うだけの十分な貯留量がある場合、すなわち浸入能 f の時間的変化は次式で表される。これは Horton の浸入能式と同形になる。

$$\left. \begin{aligned} 1) S_2 \leq Z_3 \text{ のとき;} \\ f = f_a + (f_0 - f_a)e^{-(b_1 + b_2)t} \\ f_a = f_0 b_2 / (b_1 + b_2) \\ f_u = b_1 (Z_2 + Z_3) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} 2) S_2 > Z_3 \text{ のとき;} \\ f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-ct} \\ f_c = (f_u b_2 + a_3 Z_2 b_1) / c \\ c = a_3 + b_1 + b_2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここに、 f_0 は初期浸入能、 f_c は最終浸入能、 f_u は上限浸入能である。また、 S_2 には次式で与えられる上限値 S_u を設ける。

$$S_u = (f_u - f_c) / b_1 \quad (7)$$

蒸発散に伴う貯留量の減少強度 E には次式を採用する (図3)。

$$\left. \begin{aligned} E &= \alpha E_p = E_1 + E_2 + E_3 \\ E_1 &= \delta \theta E, E_2 = (1 - \delta)E, E_3 = \delta(1 - \theta)E \\ \theta &= \begin{cases} 1 & ; S_1 > 0, \text{ または } S_2 \geq Z_3 \\ S_2 / Z_3 & ; S_1 = 0, \text{ かつ } S_2 < Z_3 \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここに、 δ は蒸発散の振分比であり、これまでの研究結果を参考に $\delta = 0.6$ とすることが多い。 E_p は蒸発散位であるが、実用上は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を用いる。本研究では Penman 法を用いて日蒸発散量を算定した。 α は係数で、無降雨日は $\alpha = 1$ 、降雨日は $\alpha = 0$ とすることが多いが、降雨日でも蒸発がある ($0 < \alpha < 1$) とする場合もある。今回は、降雨日に蒸発は起こらないとした。

蒸発散に関する式の扱いは、たとえば森林域を対象にした場合、表層土壌水分が十分な間は、第1段タンクから δE 、根群域のある第2段タンクから $(1 - \delta)E$ の蒸発散があり、表層部が乾燥したときには、残存土壌水分 S_2 に比例して第1段下層タンクから蒸発散して、不足は下層地下水から補給された水分が蒸発散する (第3段タンクから蒸発散する) という考え方に基づく。

(2) 流出計算法

このモデルの流出量は、計算時間きざみ内で降雨強度は一定として、各タンクの微分貯留方程式を連続的に解いて求める。そのため洪水時と低水時では計算の単位時間 Δt を自由に選択変更できる。通常は例えば雨天日または $S_1 > 0$ のときは1時間、その他の場合は24時間といった具合に Δt を選択する。今回の解析

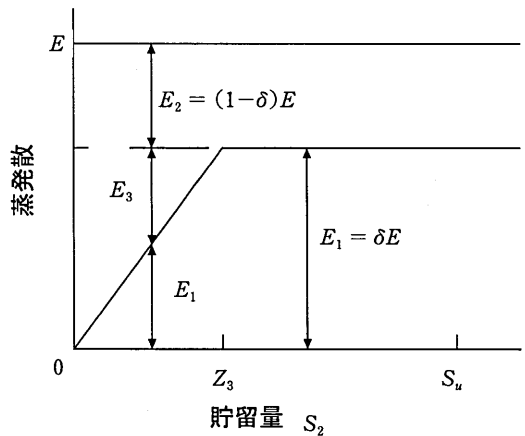


図3 貯留量と蒸発散強度の関係.

では、単位時間を10分間で固定しプログラムの簡略化を目指した。

流出計算には常微分方程式の数値解法のうち、2次のルンゲクッタ法を適用した。手順は次のようになる。

いま、時刻 t における S_j の貯留量を $S_{j,t}$ 、微分方程式の右辺を $y_{j,t}$ で表すと、 $S_{j,t}$ が既知であるとき、 Δt 後の貯留量 $S_{j,t+\Delta t}$ は次のようにして求める。

- 1) 時刻 t における各タンクの貯留量 $S_{j,t}$ に基づいて、このときの流出強度 Q_j ($j=1\sim 5$)、浸入強度 f および蒸発散強度 E_j ($j=1\sim 3$) をそれぞれの式から求める。

- 2) 微分方程式の右辺の値 $y_{j,t}$ を次式から計算する。

$$\left. \begin{aligned} y_{1,t} &= r - E_1 - f - Q_1 - Q_2 \\ y_{2,t} &= f - Q_3 - g_1 \\ y_{3,t} &= g_1 - E_2 - Q_4 - g_2 \\ y_{4,t} &= g_2 - E_3 - Q_5 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

- 3) 時刻 $t+(\Delta t/2)$ の時の貯留量 $S_{j,t+\Delta t/2}$ を次式から求める。

$$S_{j,t+\Delta t/2} = S_{j,t} + \frac{\Delta t}{2} y_{j,t} \quad (10)$$

- 4) この $S_{j,t+\Delta t/2}$ を用いて、1)と同様に、 Q_j ($j=1\sim 5$)、 f 、 E_j ($j=1\sim 3$) を求める。
- 5) 微分方程式の右辺の値 $y_{j,t+\Delta t/2}$ を2)と同様に求める。
- 6) 時刻 $t+\Delta t$ の貯留量 $S_{j,t+\Delta t}$ を次式から計算する。

$$S_{j,t+\Delta t} = S_{j,t} + \Delta t \cdot y_{j,t+\Delta t/2} \quad (11)$$

- 7) 貯留量 $S_{j,t+\Delta t}$ に基づいて、 Q_j ($j=1\sim 5$)、 f 、 E_j ($j=1\sim 3$) を求めた後、 $t \rightarrow t+\Delta t$ において、2)から繰り返す。

なお、5)において f に見合う量が最上層に貯留されている場合、前述の式を用いて流出計算を行えばよいが、そうでない場合は f または Q を新たに求め直して、 $y_{j,t+\Delta t/2}$ を計算する必要がある。今、時刻を t とすると、次のように流出よりも浸入を優先させる。

$$\left. \begin{aligned} \textcircled{1} (f+Q_1+Q_2)\Delta t > S_{1,t} + (r-E_1)\Delta t \text{ かつ} \\ f\Delta t < S_{1,t} + (r-E_1)\Delta t \text{ のとき} \\ f &= b_1(Z_2+Z_3-S_{2,t}) \\ Q_1+Q_2 &= S_{1,t}/\Delta t + r - E_1 - f \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$\textcircled{2} f\Delta t \geq S_{1,t} + (r-E_1)\Delta t \text{ のとき} \\ f = S_{1,t}/\Delta t + r - E_1, \quad Q_1 = 0, \quad Q_2 = 0 \quad (13)$$

このように再設定された f 、 Q_1 、 Q_2 を用いて Δt 後の最上層貯留水深を求めると、6)において $S_{1,t+\Delta t} = 0$ となる。また2)で $y_{j,t}(S_{j,t})$ を求める際に

も上と同様の注意が必要であり、この場合には上の説明で、 $\Delta t \rightarrow \Delta t/2$ と読み換えればよい。

(3) 流出モデル係数

長短期流出両用モデルの未知定数は、流出孔の係数 $a_1 \sim a_5$ 、浸透孔の係数 $b_1 \sim b_3$ 、流出孔の高さ $Z_1 \sim Z_3$ の他に、貯留量 $S_2 \sim S_4$ の初期水深があり、合計14個である。ただし、最上層タンクの初期水深は、一般に計算開始時点で低水時を選定し、洪水が発生していないものとして $S_1 = 0$ とする。これらの未知定数の最適同定法として、単純 GA を用いることにした。

(4) 最適同定

1) 使用するデータの期間

本研究では、1983年6～9月のデータのうち、最初の2ヶ月間を検証期間とし、後の2ヶ月間をキャリブレーション期間として流出モデル係数の同定に利用した。これは、6、7月が検証期間であった田齊ら(2004)の TOPMODEL による解析との比較のためである。

2) GA 適用のための各パラメータの範囲

永井ら(2003)が提案している標準的モデル定数を参考にして、次のように設定した。

$$\left. \begin{aligned} 0.001 \leq a_1 \leq 0.016 \\ 0.01 \leq a_2 \leq 0.08 \\ 0.005 \leq a_3 \leq 0.03 \\ 0.001 \leq a_4 \leq 0.006 \\ 0.00001 \leq a_5 \leq 0.0002 \\ 0.01 \leq b_1 \leq 0.16 \\ 0.003 \leq b_2 \leq 0.015 \\ 0.001 \leq b_3 \leq 0.004 \\ 10.0 \leq Z_1 \leq 80.0 \\ 50.0 \leq Z_2 \leq 250.0 \\ 10.0 \leq Z_3 \leq 50.0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

(5) パラメータ同定の評価基準

今回は次の3つの評価基準を比較し、どの評価基準が妥当かを検討した。なお、 Q_{ci} は i ステップの計算流量、 Q_{oi} は i ステップの実測流量、 N はデータ数であり、 F_t は単純 GA による最適値探索における適応度である。

$$1) \text{ 二乗誤差：高水部（洪水部）の適合度を重視} \\ E_1 = \sum_{i=1}^N (Q_{ci} - Q_{oi})^2 / N, \quad F_t = \frac{1}{E_1} \quad (15)$$

$$2) \text{ カイ二乗誤差：全体的な適合度を重視} \\ E_2 = \sum_{i=1}^N [(Q_{ci} - Q_{oi})^2 / Q_{oi}] / N, \quad F_t = \frac{1}{E_2} \quad (16)$$

3) 相対誤差：低水部（地下水流出部）の適合度を重視

$$E_3 = \sum_{i=1}^N [|Q_{ci} - Q_{oi}| / Q_{oi}] / N, F_i = \frac{1}{E_3} \quad (17)$$

(6) TOPMODEL の概要

以下では長短期流出両用モデルと TOPMODEL の解析結果を比較する。TOPMODEL（田齊ら，2004）は，根群域と地下水貯留部の水収支を集中定数型として扱い，地表流出および地下水涵養までを含めた表層および土壌水分は分割されたグリッドごとの分布定数型として扱う特徴を持つ。このことにより，地下水は集中定数型の特徴である単純な構造で表し，流路網を形成する地形や時間，空間的に変動する寄与域については分布定数型モデルのパラメータにより表現される。

結果と考察

1. 評価基準の検討

各評価基準による最適同定の結果を図4，5，6に示す。ここで，同図上段には観測降雨量，中段に対数スケール，下段に通常スケールの流量をそれぞれ示している。

3つの評価基準を比較してみると，二乗誤差は大雨

後の低減部の再現性に乏しく，相対誤差は大雨時の再現性に問題が残る。これに対して，カイ二乗誤差では最適同定結果が総合的に良好な上，カイ二乗誤差は全体的な適合度を重視するという長短期流出両用モデルの目的に適っていることから，カイ二乗誤差による最適同定結果を TOPMODEL との比較に使用することにした。カイ二乗誤差による最適同定結果は以下の通りである。

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= 0.0142, a_2 = 0.0306, a_3 = 0.0106, \\ a_4 &= 0.00100, a_5 = 0.00002 \\ b_1 &= 0.0459, b_2 = 0.00455, b_3 = 0.00395 \\ Z_1 &= 15.5, Z_2 = 50.8, Z_3 = 49.4 \\ S_2 &= 8.33, S_3 = 23.8, S_4 = 249.8 \end{aligned} \right\} (18)$$

2. 流量の再現性

今回，比較対象として，田齊ら（2004）が実施した TOPMODEL の解析結果を使用した。ここで，1983年6-7月の流況曲線を図7に示す。TOPMODEL と長短期流出両用モデルの解析結果はともに再現性がよく，山地小流域で有効であることがわかる。なお，細部を見ると，長短期流出両用モデルでは少量の降雨でも敏感に反応しており，TOPMODEL では低水部の再現

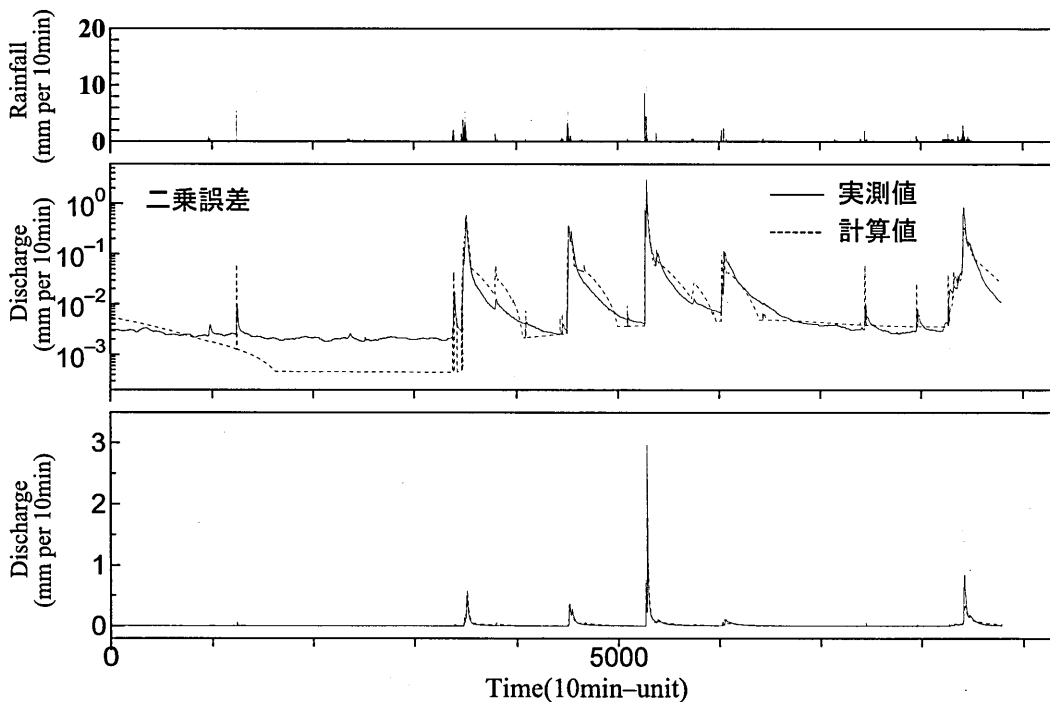


図4 1983年8～9月の流況曲線（二乗誤差）。

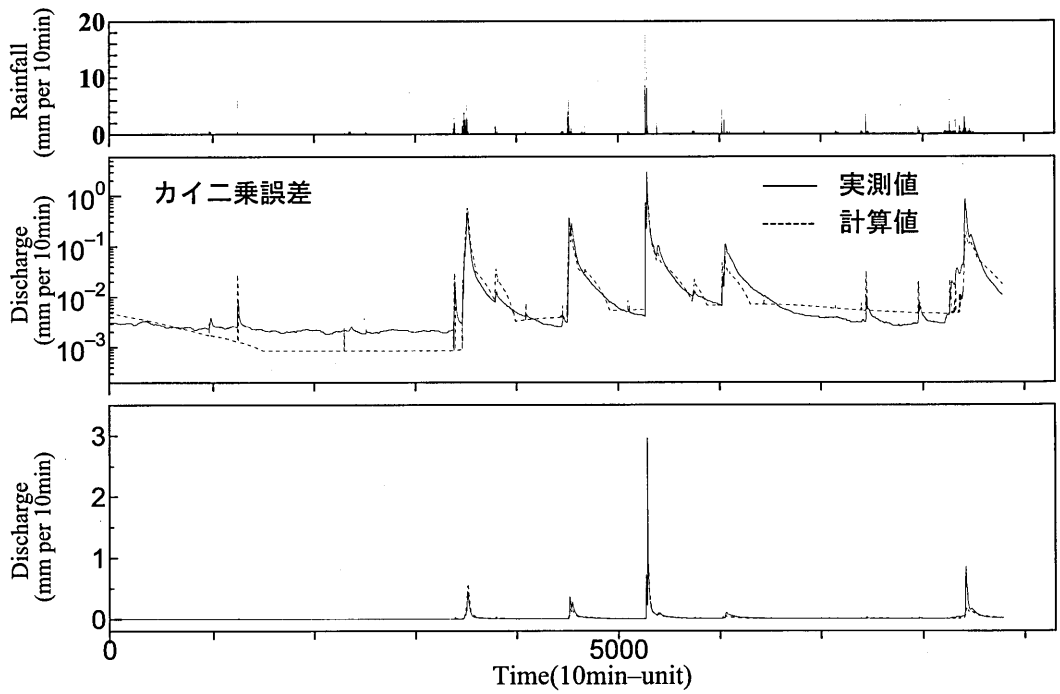


図5 1983年8～9月の流況曲線 (カイ二乗誤差).

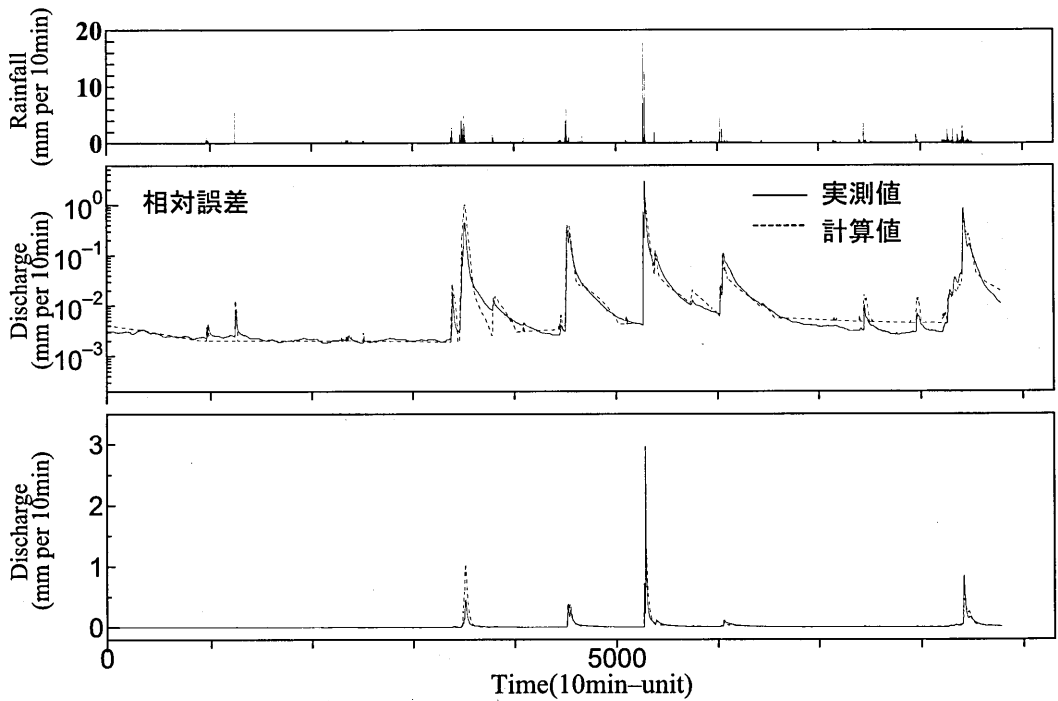


図6 1983年8～9月の流況曲線 (相対誤差).

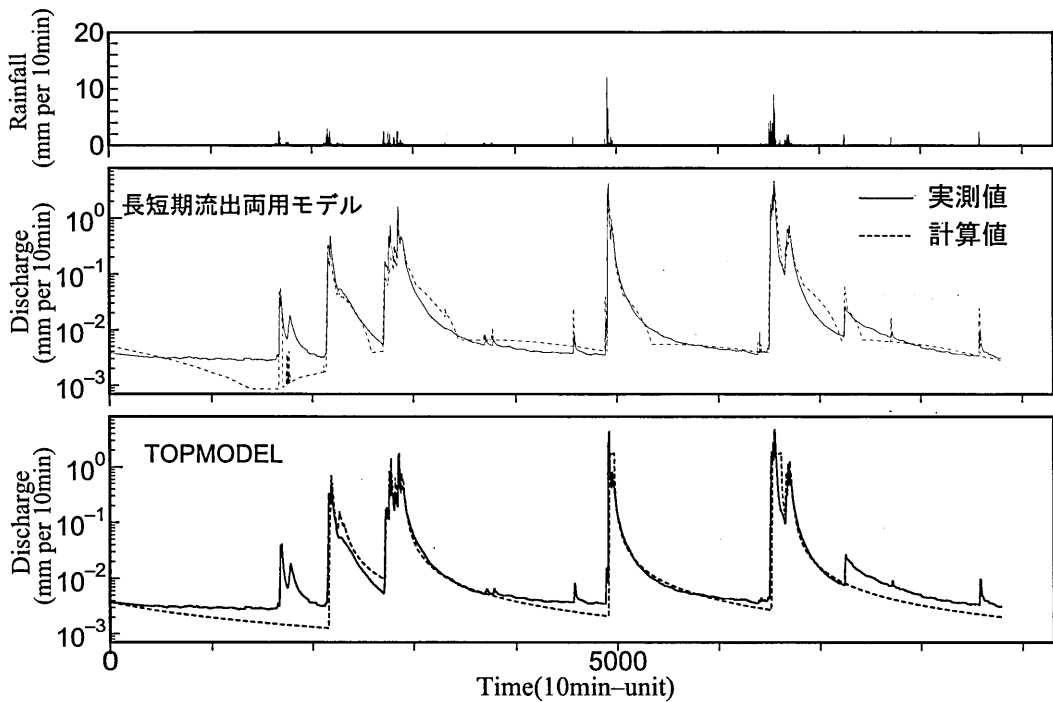


図7 1983年6～7月の流況曲線.

が滑らかであり、両者の特徴が良く表現されている。

以上のように、長短期流出両用モデルは洪水流出・長期流出ともに再現性は良好で、山地小流域の流出解析に有効であることが明らかになった。また、最適同定の際に参考にした標準的モデル定数は流域面積の比較的大きな地点での結果であったが、今回の小流域にも充分適用可能であることが示された。なお、再現性の精度を高めるには、①流出計算の単位時間を洪水時と低水時で変更する、②最適同定の際のキャリブレーション期間をより長くとる、などが考えられる。

要 約

長期流出モデルおよび洪水流出モデルの両特性を有した長短期流出両用モデルが提案され、山地流域において有効な流出解析法の一つとされている。このモデルは有効降雨を内部で算定する機能を有し、洪水と低水を同時に連続して解析できる特長を持つ。

本研究では、山地小流域である御手洗水試験流域

(流域面積 0.095km^2)の流出解析における長短期流出両用モデルの適用可能性を検証するとともに、長短期流出解析法の一つであるTOPMODELによる解析結果と比較し、両モデルの特徴を考察した。なお、流出モデル係数の最適同定法として単純GAを用いた。

検証の結果、長短期流出両用モデルは洪水流出・長期流出ともに再現性は良好であった。また、TOPMODELとの比較では、長短期流出両用モデルでは少量の降雨でも敏感に反応しているのに対し、TOPMODELでは低水部の再現が滑らかであり、両モデルの特徴を把握できた。

文 献

- 永井明博・田中丸治哉・角屋睦 2003 ダム管理の水文学。森北出版、東京、22-33頁
 田齊秀章・平松和昭・森 牧人・四ヶ所四男美 2004 TOPMODELによる山地小流域の長短期流出解析。九大農学芸誌、59(2):173-183

Summary

The long- and short-term runoff model is one of the valuable runoff analyses in mountainous basins. This model contains advantages in each of the long-term and flood runoff models. In other words, it has characteristics that calculate effective rainfall inside it and analyze both flood and long-term runoff successively.

In this paper, the long- and short-term runoff model was applied to runoff analysis in the Ochohzu study basin of 0.095km², and applicability of it to the small mountainous basin. Characteristics between it and TOPMODEL were discussed through the prediction accuracy of river discharge. Fourteen unknown parameters in the model were identified using a simple genetic algorithm (SGA) with the fitness function defined by a χ^2 error between observed and calculated river discharges. The results indicated that the SGA-optimized the long- and short-term runoff model and could successfully predict the river discharge in a rainy season.