

SMPTモデルを用いた 分布型水循環モデルの改良について

Development of a Distributed Hydrologic Model Using SMPT Model and
its Application to the Azuma Upperriver Experimental Basin.

天口英雄¹・安藤義久²
Hideo AMAGUCHI, Yosihisa ANDO

¹ 正会員 東京都立大学助手 大学院工学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

² フェロー 工博 東京都立大学教授 大学院工学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

The objective of this study is to improve a distributed hydrologic model using SMPT(Soil Moisture Parameter Tank) model by applying kinematic wave model to river flow routing changing time step of day to an hour. The watershed basin is divided into a grid cell of 50m. This model is composed of three structure; surfaces division, river division, and groundwater division. In surface division, evapotranspiration, infiltration, percolation, interflow, and surface outflow were computed in each cell. Kinematic wave model was applied to river flow components. Groundwater component computes the groundwater levels and the flows in the saturated zone of an unconfined aquifer, stream interactions, and groundwater seepage at the ground water surface. The model is applied to simulate water cycle in the Azuma Upper Experimental basin (1.81km²) with a time step of an hour. The model parameter is calibrated through comparison of the simulated river discharge, groundwater levels with the observed value.

Key words: Hydrological cycle, Distributed model, Groundwater runoff, Runoff, DEM(Digital Elevation Model)

1. はじめに

DEMを利用した分布型水循環モデルの開発に関する研究が、数多く行われている¹⁾²⁾。本研究で対象とする分布型水循環モデルは、地表面下のRichard'sの式を用いた不飽和水分移動を考慮せず、パラメータの設定などが容易なSMPT(Soil Moisture Parameter Tank)モデルを用いて鉛直方向のみの水分移動を考慮した点に特徴がある。このモデルは安藤・高橋・有賀・金尾³⁾が1982年、多摩丘陵の都市流域である乞田川流域において適用の可能性を示した水循環モデルであり、このSMPTモデルを用いた日単位の分布型水循環モデルについては、東川上流試験流域において地下水位および流出量の再現が筆者らにより確認されている⁴⁾⁵⁾。本研究での水循環モデルの改良は、日単位の降雨から時間単

位に変更し、洪水ハイドログラフと比較可能にする事、および浸透域の浸透能を決定する際に土壤水分量をパラメータとするHorton式を用いて浸透量を考慮する事を行った。時間単位の適合性を高めるためには、直接流出(表面流出)の流域貯留効果を考慮するモデル(流量追跡)が必要であるが、本研究では小流域を対象としている理由から、河道追跡のみをkinematic wave法で行った。改良したモデルを都市化の進んでいる埼玉県南西部所沢市の流量観測や民家の地下水観測が行われている東川上流域(流域面積1.81km²)に対して、モデルの適合性について検討することを本研究の目的とする。

2. 分布型モデルの概要

本モデルは流域をメッシュ分割した各グリット内の直接流出量・地下水涵養量を土地被覆状況に応じて算定する。これらの水文量を流域の地形特性を表すメッシュデータで構成された表面流出モデル・地下水流動モデルを用いて水平方向の流量追跡を行い、河川の存在するメッシュを含む地点において河道モデルに受け渡されて流出量が合計される構造となっている。降雨は1時間単位で入力され、直接流出量は1時間単位、地下水流出は地下水涵養量の日平均値（1時間単位）を入力する。

(1) モデルの構成

改良したグリットモデルは、図-1のように鉛直水文移動量のみを対象とした浸透・不浸透域モデル、地下水涵養モデルと水平水分移動を対象とした表面流出モデル、地下水流動モデルで構成され、表面流出及び地下水流動モデルからの流出量が河道モデルに引き渡される。各モデルの機能は表-1のとおりである。以下ではモデルの構成要素について説明する。

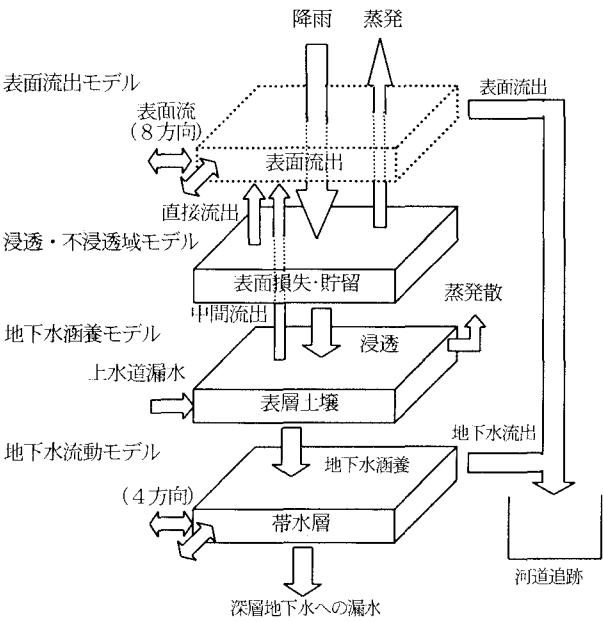


表-1 各モデルの機能

モデル名	水分移動	対象とする水文量
表面流出モデル	水平方向	表面流出
浸透・不浸透域モデル	鉛直方向	浸透量・有効雨量・表面貯留・蒸発
地下水涵養モデル	鉛直方向	地下水涵養量・土壌水分量・蒸発散量・中間流・上水道等の漏水
地下水流動モデル	水平方向 鉛直方向	地下水流動 不圧地下水流出・深層への漏水
河道モデル	水平方向	河道流下

(2) 表層モデル

a) 不浸透域

不浸透域からの直接流出 D は、山口・松原・山守⁶⁾により、不浸透域 I_{imp} を生起領域として表層損失量 L_{imp} を超えた雨量が流出する。

$$D_{imp}(t) = I_{imp}(P(t) - L_{imp}) \tag{1}$$

ここで、 D_{imp} ：不浸透域からの直接流出量(m/hr)、 $P(t)$ ：時間雨量(m/hr)、 I_{imp} ：不浸透域面積率、 L_{imp} ：降雨時の不浸透域の初期損失、屋根・道路などの初期吸収・窪地貯留であり、後に不浸透域からの蒸発量となる。なお、全直接流出量は不浸透域からの直接流出量 D_{imp} と以下に説明する浸透域からの直接流出量 D_i を加えたものである。

b) 浸透域

浸透域では、浸透能を用いて表層貯留量・浸透量・直接流出量を計算する。浸透能は修正Hortonモデル⁷⁾(2)式により計算される。なお、浸透量は降水量と浸透能(土壌中の水分不足)により決定され、(4)式で計算される。

$$f_i(t) = fc_i + (fo_i - fc_i)e^{-kT_h(t)} \tag{2}$$

ここで、 $f_i(t)$ ：時刻 t の浸透能(m/hr)、 fc_i ：終期浸透能(m/hr)、 fo_i ：初期浸透能(m/hr)、 k ：浸透係数(1/hr)、 $T_h(t)$ ：次式で表される土壌水分量を関数とする時刻、 l ：表層被覆分類である。

$$T_h(t) = -\ln(1 - \theta_r(t))/\alpha \tag{3}$$

ここで、 $\theta_r(t)$ ：土壌相対水分量(m/m)、 α ：係数(土壌実験やキャリブレーションにより求める)である。

本モデルでは表層土壌モデル内で物理的な土壌相対水分量を計算していないため、SMPTモデルで用いている土壌水分量保留量 Ms と最小容水量 Mn の比を用いて表した。

地下への浸透量は降水に浸透面積率をかけ、時間雨量が表層浸透能 $f_i(t)$ を越えない場合は全量浸透し、表層浸透能を超えた時は、浸透能のみが浸透するものとし、以下に計算式を示す。

$$I_i(t) = \begin{cases} P(t) & P(t) \leq f_i(t) \\ f_i(t) & P(t) > f_i(t) \end{cases} \tag{4}$$

$$I(t) = \sum I_i(t) \cdot I_p \tag{5}$$

ここで、 $I_i(t)$ ：土地利用別浸透量(m/hr)、 $I(t)$ ：浸透量(m/hr)、 I_p ：浸透面積率(m²/2500m²)である。ただし、 $P(t) > f_i(t)$ の場合、浸透域からの直接流出量は降水量から土地被覆状況に応じた貯留量と終期浸透能を考慮した(6)～(8)式によって計算される。

$$D_i(t) = \begin{cases} 0 & \Sigma P(t) \leq L_i \\ P(t) - I_i(t) - S_m & \Sigma P(t) > L_i \text{ \& } P(t) > S_m \end{cases} \quad (6)$$

$$D(t) = \Sigma D_i(t) \cdot I_p \quad (7)$$

$$S_i(t) = \begin{cases} 0 & \Sigma P(t) \leq L_i \\ P(t) - I_i(t) & \Sigma P(t) \leq L_i \text{ \& } L_i < P(t) \leq S_m \\ S_m & \Sigma P(t) \leq L_i \text{ \& } P(t) > S_m \end{cases} \quad (8)$$

$$P(t+1) = P(t+1) + \Sigma S_i(t) \cdot I_p \quad (9)$$

ここで、 $D(t)$ ：浸透域からの直接流出量 (m/hr)、 $\Sigma P(t)$ ：累加雨量 (m)、 L_i ：降雨時の浸透域の初期損失 (浸透域からの蒸発量) (m)、 S_m ：浸透域貯留容量 (m/hr)、 $D_i(t)$ ：土地利用別直接流出量 (m/hr)、 $S_i(t)$ ：窪地貯留量 (m/hr) (窪地貯留量は計算上次の時間の降雨に加える) である。

b) 蒸発散(E)

蒸発散量は、月平均気温データに基づき、以下に示すHamonの式により月別の日平均蒸発散能 E_{pi} を求める。

$$E_{pi} = 0.14 D_{oi}^2 \cdot q_{ii} / 1000 \quad (10)$$

ここで、 E_{pi} ：i月の日平均蒸発散能 (m/day) D_{oi} ：i月の日照時間 (12hr/day) q_{ii} ：i月の日平均気温に対する飽和絶対湿度 (mg/m³) である。

これから、各月の月単位の蒸発散能 E_{Mi} に補正係数 e を乗じ、日単位への変換はその日の降雨量によって決定される重み係数 $\alpha(t)$ ⁴⁾ を用いて、(11)式により日蒸発散量 $E(t)$ (m/day) を求める。

$$E(t) = e \cdot E_{Mi} \cdot \frac{\alpha(t)}{\Sigma \alpha(t)} \quad (11)$$

ここで、 $\Sigma \alpha(t)$ ：その日が属する月の α の合計 e ：蒸発散の補正係数である。(11)式により得られた日常蒸発散量に、多摩ニュータウンの永山試験流域においてウーダイユ式自記蒸発計により得た観測値から求めた蒸発量の24時間の割合 (表-2) をかけ、24時間に配分した。

表-2 1日の蒸発散量の割合

3	2	3	2	2	2	3	3	3	4	6	6
7	7	8	7	6	5	5	4	3	3	3	3

(上段：左から1~12時、下段：左から13~24時)

c) 地下水涵養(G)・中間流(Qm)

地下水涵養は、安藤・虫明・高橋⁴⁾が考案したモデルを用いる。このモデルに河道付近の中間流を考慮する為、地下水の不圧減水式が中間流 (早期の地下水流出成分) であると仮定して地下水の早い流出成分を組み込んだ。

単位メッシュ内の表層土壌水分量 Ms' は、浸透量 I にその前日の表層土壌水分量 Ms に加えられ、Hamon式

と降雨の重み付けを行い求めた蒸発散 E を差し引いて求める。地下水涵養量 G は表層土壌水分量 Ms が最小容水量 Mn を超過した値に比例定数 β を乗じて求められる。また、河川近傍 (河川を含むメッシュ) では表層土壌水分量 Ms' が仮定した最大の水分保留量 Mx を超過した場合には中間流出 Qm が生じるものとした。河川以外のメッシュでは大きい Mx を与えることにより中間流出は考慮しない。

$$Ms'(t) = Ms(t) + I(t) - Ei(t) + Qj \quad (12)$$

$$G(t) = \begin{cases} 0 & Ms'(t) \leq Mn \\ \beta(Ms'(t) - Mn) & Mn < Ms'(t) \leq Mx \\ \beta(Mx - Mn) & Ms'(t) > Mx \end{cases} \quad (13)$$

$$G_m(t) = \begin{cases} 0 & Ms'(t) \leq Mn \\ 0 & Mn < Ms'(t) \leq Mx \\ \gamma(Ms'(t) - Mx) & Ms'(t) > Mx \end{cases} \quad (14)$$

$$Ms(t+1) = Ms'(t) - G(t) - G_m(t) \quad (15)$$

$$Q_m(t) = Au^2 G_m(t)^2 \quad (16)$$

ここで、 Ms' ：蒸発散量を差し引いた後の表層土壌水分量 (m) Ms ：表層土壌水分量 (m) I ：浸透量 (m/hr) Ei ：蒸発散量 (m/hr) Qj ：上水道からの漏水 (m/hr) G ：地下水涵養量 (m/hr) β ：地下水涵養の比例定数 Mn ：最小容水量 (m) Mx ：河川近傍での最大の水分保留量 (m) γ ：河川近傍での地下水涵養の比例定数 Q_m ：河川近傍での中間流出量 (m/hr) Au ：不圧減水定数 G_m ：河川近傍での地下水涵養量 (m/hr) である。

d) 地下水流動と河川への地下水流

本解析モデルの地下水流動は、不圧地下水のみを対象とし、これに加えて深層地下水への漏水を考慮して行った。不圧地下水の平面2次元の基本式は、ダルシーの法則と連続式により次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(KI(h-Z) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(KJ(h-Z) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + R + q_{riv} + q_{lk} = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (17)$$

ここで、 KI, KJ ：x, y方向の透水係数 (m/hr)、 h ：地下水位標高 (m)、 Z ：不透水層 (帯水層下面) の標高 (m)、 $R = \sum_{i=1}^{24} G(t) / 24$ ：地下水涵養量 (m/hr)、 q_{riv} ：地下水流量 (m/hr)、 q_{lk} ：深層地下水への漏水 (m/hr)、 S ：有効空隙率 である。

河川の存在するメッシュでは、河川と地下水の水分移動を考慮する為、河川と地下水流の関係は次式に

より計算する.

q_riv = l(h_riv - h) (18)

l = (k_riv * A) / (dr * ΔxΔy) (19)

ここで、q_riv : 地下水流出量 (m/hr)、h_riv : 河川水位、h (m) : 河川の存在するメッシュの地下水位 (m)、k_riv : 河床の透水係数 (m/hr)、dr : 河床の厚さ (m)、A : 河床面積 (m^2)、Δx, Δy : x、y 方向のメッシュ距離 (m) である.

e) 表面流出追跡

直接流出Dにより生じる表面流出、中間流出および地下水流出は、流域内のDEMに基づいて、対象メッシュの標高H(I, J)の周囲の8メッシュのうち最急勾配方向に流れるものとして決定する.

f) 河道流追跡

e)において、河道メッシュ地点まで累加された流量を河道に引渡し流量追跡が行われる.

河道追跡は、kinematic wave法を用いた. この追跡手法は摩擦勾配に関する項と河床勾配の項から導かれた式であり、以下に示す連続式と運動方程式により支配方程式を作成する.

連続式 ∂A/∂t + ∂Q/∂x = q (20)

運動方程式 Q = (1/n) * R^(2/3) * S^(1/2) * A (21)

ここに、Q : 河道流量 (m^3/hr)、n: 粗度係数 (hr/m)、R : 径深 (m^2/m)、S : 勾配 (m/m) A : 流水断面積 (m^2)、q : 流域からの河道単位長さ当たりの横流入量 (m^2/hr) である. この流入量を河道と重なるメッシュからの流入量として受け取り、河道追跡を行った.

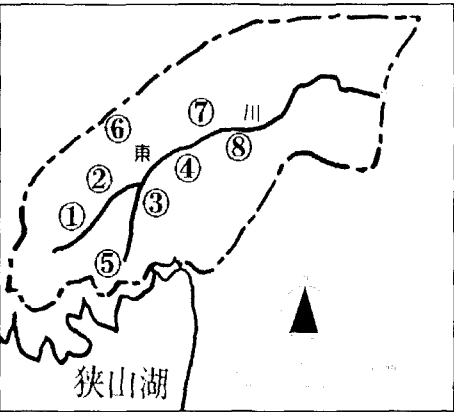


図-2 上流域の観測井位置図

3. 東川上流試験流域への適用

本章では、安藤・高橋・有賀・金尾³⁾が1982年、多摩丘陵の都市流域である乞田川流域において適用の可能性を示した水循環モデルを用いた分布型モデルを東川上流試験流域に適用し、直接流出、地下水流出、地下水位について考察し、本モデルの適合性について検討する.

(1) 対象流域の概要

東川は源流を狭山湖付近に発し、中流部付近で所沢市街地を貫流して柳瀬川に合流する流域面積18.1km^2の河川であり、図-3に流域の概要図を示す. 流域の地質は浸透性、保水性に優れた関東ローム層で形成される下末吉面所沢台に位置するために、この台地上への降水はローム層内の地下水の主要な涵養源となっている. 涵養された地下水は粘土層の上面に沿ってゆっくり流れ、谷地等の斜面部で東川に湧水として流出している.

東川上流域の土地利用を1994年の首都圏細数値情報(10mメッシュデータ)を用いて求めた結果を表-3に示す. この上流域は所沢市街地から3.5kmほどに位置し市街化調整区域であることから畑、森林などで約60%を占める. 流域内には雨水流出対策施設は主に浸透枳が設置されており、その対策面積は約1.4haとなっている.

表-3 東川上流試験流域の土地利用別の面積率(%)

土地利用	道路	屋根	間地	畑	森林
面積率	6	4	31	41	17

河川面積 0.5%、水田0.5%を加えて100%となる.
間地は、工場や公園などを含める.

(2) 対象データ

a) 水文データ

水循環モデルの検証のための解析期間はモデルで利用するパラメータ等のキャリブレーションのため5年

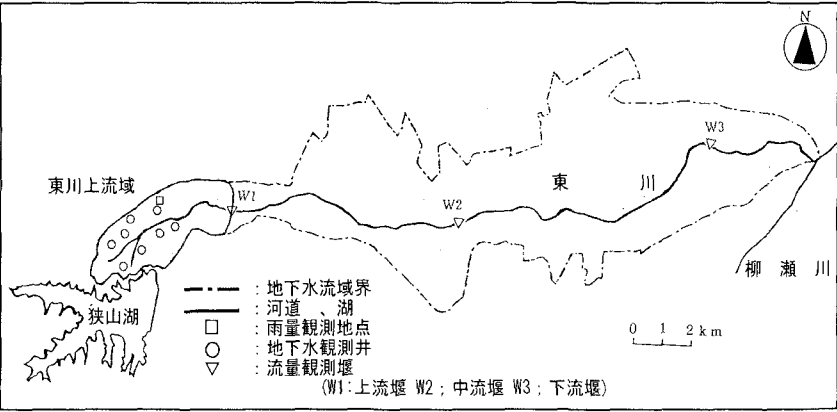


図-3 東川上流試験流域概要図

程度行うのが望ましいと考えられるが、本流域では流出量データの蓄積が少ないために、対象とする解析期間は1997年1999年までの3年間とする。人為排水の分離は、無降雨期間の日周期変化として早朝に最低流出が出現するので、この流量を当日の地下水流出とし、最低流出を上回る流量を当日の人為排水とした。

b) 流域特性データ

対象流域の標高数値地図データは国土地理院発行の50mメッシュデータを利用することも考えられるが、本研究では1/2500地形図を基準に土地利用データ等を作成している関係で、同様に1/2500地形図をもとに流域内に窪地が発生しない様に50m×50mのデータを作成した。土地利用データは細密数値情報（10mメッシュ）を基本的に利用するが、このデータでは家屋の屋根等不透透域面積が十分に表現されていない為に1/2500地形図を元に屋根面積、道路面積を50mメッシュのデータとして作成した。

c) 河道データ

河道のデータは、データID、メッシュ位置、河川区間延長、河川幅、水路勾配、粗度係数から構成されるデータファイルを作成して河道追跡を行った。河川区間延長および水路勾配は河川の平面図および縦断面図から作成し、河川幅は横断面図より計測して矩形断面とし

て設定した。

(3) パラメータの同定

モデルで用いるパラメータは表-4に示すように決定を行い、同定の必要なパラメータは水循環解析を行って求めたものである。モデル作成の為に地下水理構造については、多少の地質データを参考にしたが、地下構造・有効空隙率・透水係数・など大半のパラメータについてはモデル作成時に流出高データや地下水位データを参考に試行錯誤により設定したものであり、今後は現地観測データを取り入れていく必要がある。

表-4 パラメータの設定方法と同定結果

雑排水	最低流出量を上回る流量を人為排水とする。
蒸発散能	月平均気温データからハモン式を用いて算出した。
不透透域・浸透域	細密数値情報(10m)を用いて区分した。
初期損失量(不透透域)	道路・屋根ともに $2 \times 10^{-3} \text{m}$ とした。
初期損失量(浸透域)	主に、畑・森林・民家の間地ともに $1 \times 10^{-3} \text{m}$ とした。
窪地貯留能(浸透域)	地形勾配の緩い畑($2 \times 10^{-3} \text{m}$)、民家間地($3 \times 10^{-3} \text{m}$)。
浸透能	既往の研究を参考に ⁹⁾ に設定 土地利用により $10 \sim 40 \times 10^{-3} \text{m}$ を設定
上水道漏水	流域内人口1人当り給水量×漏水率により算出
地下水涵養の比例定数	既往の研究を参考に0.8とした。
最小容水量	$200 \times 10^{-3} \text{m}$
水平方向の透水係数	同定の結果 $2 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-2} \text{ (m/hr)}$
有効空隙率	同定の結果 0.05~0.25
河川の漏水係数	同定の結果 $1.0 \times 10^{-3} \text{ (m/hr)}$

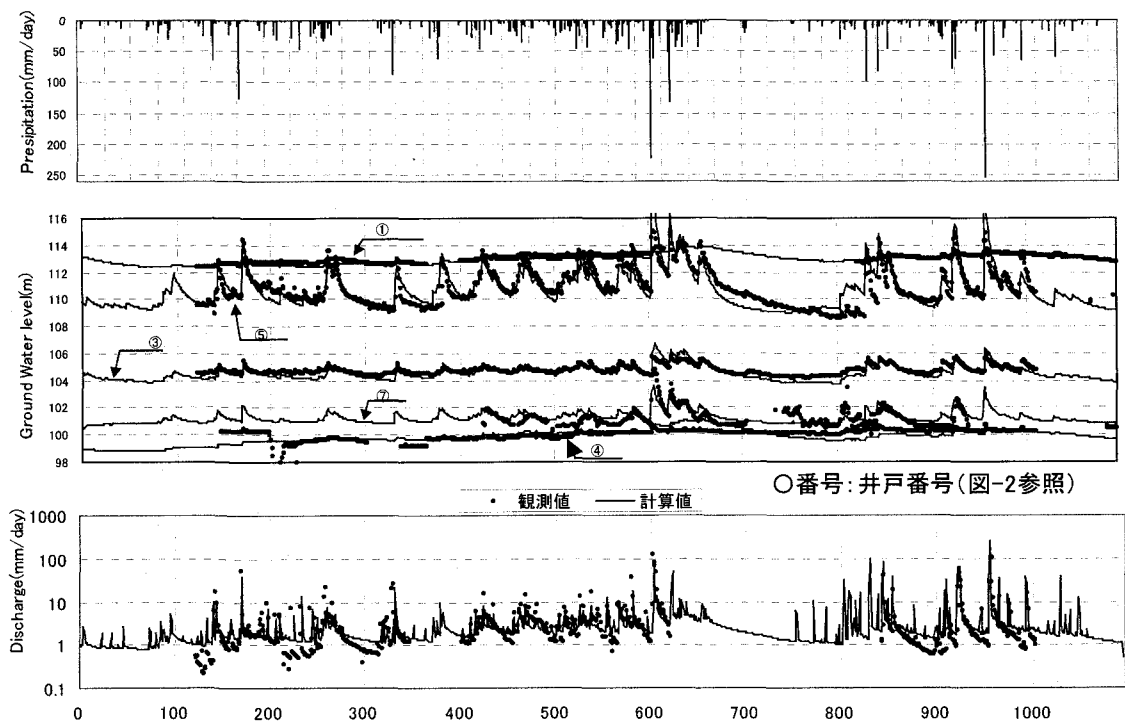
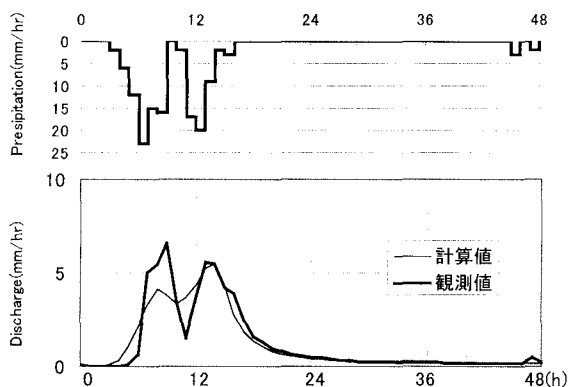


図-4 解析結果(日単位)

4. 解析結果と考察

上述の改良した分布型水循環モデルを東川上流試験流域に適用し、上流堰での流出高および、各観測井との比較を行った日単位出力の結果を図-4に上段に降雨、中断に地下水位、下段に流出高を示す。この図から、地下水位の計算値と実測値は多少誤差があるものの、大小の降雨に対して水位の上昇、下降がよく再現されていることが読み取れる。流出高についても観測値をよく再現しているが、無降雨期間については計算値が観測値を上回る傾向がある。その理由の1つとして、土壌を構成するモデルは水分移動を鉛直下方向のみを考慮し、最小含水量を基準として表層土壌水分量の変化のみで地下水涵養量を計算するSMPTモデルでは表されていない不飽和帯の水分移動を考慮していないことが考えられる。今後、不飽和帯の水分移動を考慮したモデルと比較してSMPTモデルの特性を明らかにすることが今後の課題である。

図-5は洪水期間のハイドログラフの一例であり、上段に降雨、下段に流出高を示す。流出波形を再現はしているが、1番目のピーク雨量に対して観測値を下まわると2番目の降雨に対してはよい再現が行われた。1番目の降雨に対して再現が得られない理由について



は今後の検討が必要であるといえる。

以上の結果から、比較的モデル構造が単純なSMPTモデルを用いた分布型水循環モデルの実流域への有効性が示されたといえる。

5. 結論と今後の課題

本研究により、東川上流試験流域の水循環機構を解明するため、安藤等²⁾の示した都市流域を対象とする水循環モデルを用いた分布型モデルの適合性について、

流出高のみならず地下水位を含めて検討を行った結果、本モデルによる流出高・地下水位の再現性は良好に示された。一方、無降雨期間が続く時に計算値が実測値より大きくなる原因や、洪水期間のハイドログラフの波形は再現されているが流出高のピークが再現されていない原因などについては今後の検討課題といえる。

- (1) これまで集中型水循環モデルとして利用されていたSMPTモデルを用いて分布型水循環モデルの開発を行った。
- (2) 作成したモデルを東川上流試験流域へ適用し、流出高、地下水位を長期間よく再現できることを確認した。
- (3) 今後の課題として以下の検討が挙げられる。
 - ・ 対象とする流域範囲を拡大し、東川流域全体の水循環モデルを作成する。
 - ・ 流域内に設置した雨水浸透貯留施設の効果を評価できるようにする。

参考文献

- 1) 中村茂・中嶋規行・忌部正博・Srikantha Herath : グリット型水循環系解析モデルの開発 海老川流域を対象として、土木学会水工学論文集, 第45巻, pp103-108, 2001.
- 2) 賈仰文・倪广恒・河原能久・末次忠司 : 都市河川流域の水循環解析と雨水浸透施設の効果の評価, 土木学会水工学論文集, 第44巻, pp151-156, 2000.
- 3) 安藤義久・高橋裕・有賀茂・金尾健司 : 丘陵地の中小河川流域の水循環機構と都市化によるその変化, 土木学会水理講演会論文集, 26, 1982.
- 4) 天口英雄・安藤義久 : SMPTモデルを用いた分布型水循環モデルの開発と東川上流試験流域への適用, 土木学会水工学論文集, 第45巻, pp97-102, 2001.
- 5) 安藤義久・天口英雄・大塚祐哉・篠原正行 : 東川上流試験流域の水循環機構, 水文・水資源学会2000年研究発表会要旨集, pp190-191, 2000.
- 6) 山口高志・松原重昭・山守隆 : 都市流出調査-降雨損失機構の検討-, 土木技術資料, Vol13, No10, pp483-487, 1970.
- 7) Wilson Huaisheng Chen : Objected Watershed Link Simulation, Technical Documents, pp35-36, 1997
- 8) 藤村和正・安藤義久・山田富美夫・山田理 : 定常降雨による湛水発生時間及び浸透能に関する研究, 土木学会水工学論文集, 第45巻, pp193-198, 2000.

(2001. 10. 1受付)