

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

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, Yoshitsa 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 develop a distributed hydrologic model using SMPT(Soil Moisture Parameter Tank model) which was presented by Ando et. al. (1982). The watershed basin is divided a grid cell of 50m in which direct runoff, evaporation, and ground water runoff was calculated. The model is applied to simulate water cycle in the Azuma Upper Experimental basin (1.81km²) with a time step of a day. The model parameter is calibrated through the compare the simulated river discharge, groundwater levels and with the observed value.

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

1. はじめに

これまで高度経済成長を通して、都市への人口集中や産業活動の発展に伴い、生活様式の高度化が進められてきた。この過程で上下水道の整備や土地利用の変化により降雨の流出過程が変化してきたことが指摘されている。このような流出過程を解明し、将来の予測を行う水循環機構をモデリングすることは、今後の水環境の保全を行っていく上で重要である。

物理分布型水循環モデルは、集中型水循環モデルと比較して人工・自然の流出過程をより詳細に表現できる為、水循環機構の解明を行うには多くの利点がある反面、パラメータの設定や計算労力などに多大な時間がかかる。そこで本研究では、安藤・高橋・有賀・金尾¹⁾が構築した概念モデルであるSMPTモデル (Soil Moisture Parameter Tank Model) を用いて分布型水循環モデルの作成を行った。

本研究の目的は、作成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に適用し、モデルの適合性について検討することである。

2. モデルの構成

(1) モデルの概要

本研究における解析モデルは、安藤・高橋・有賀・金尾¹⁾が1982年に多摩丘陵の都市流域である乞田川流域において適用性が示された日単位の水循環モデルを用いる。このモデルは、これまで東川上流域にも適用²⁾したが降雨後数日間実測を下回る傾向がある為、浸透モデルの改造を行い、河川近傍においては中間流出を考慮した。

図-1は本モデルにおいて1メッシュ内で計算される鉛直方向の水文過程を示しており、解析は土地利用に応

じた浸透モデル・不浸透モデルによって解析される。浸透モデルでは、表層水分貯留量において上水道等の漏水や、不圧帯水層からの深層への涵養を考慮した。

図-2はメッシュ状に分割したモデルの平面状の流出過程を示す。解析を行う時間データは日単位を対象とすること、解析対象の流域面積が1.81km²である理由から、直接流出（河川流出）の遅れを無視できると仮定した。その為、不圧地下水より涵養された河川流出量に直接流出量・河川近傍の早い地下水流出量を加え、数値標高データにより決定された落水線に沿ってこれらの流出量を累加した流量を日単位流量として分布型水循環解析モデルの作成を行った。

(2) 日単位の水循環モデル

モデルの基本構造は、浸透域からの浸透・地下水涵養、不浸透域からの直接流出から構成され、これらを各メッ

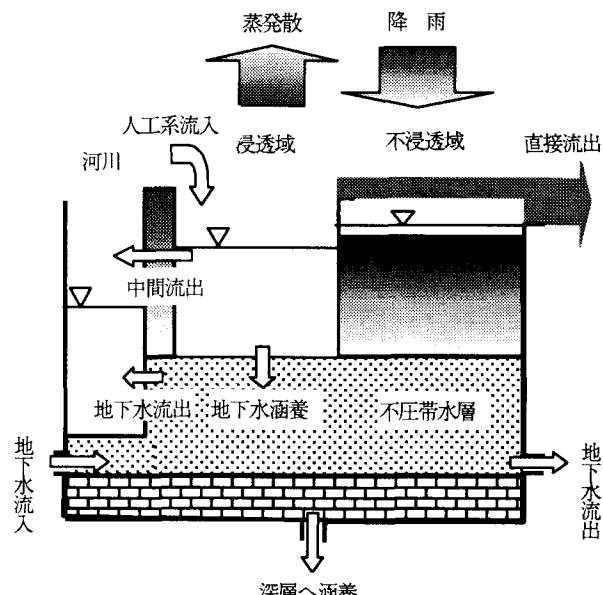


図-1 メッシュ鉛直方向の水文過程

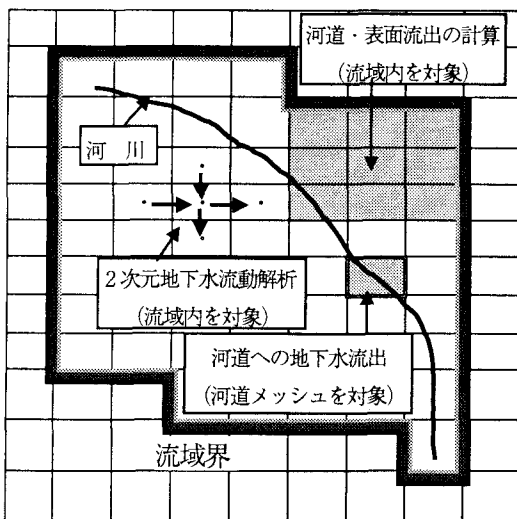


図-2 水平方向の水文過程

シュにおいて計算する。

a) 直接流出(D)

不浸透域からの直接流出Dは、山口・松原・山守³⁾により、不浸透域I_{imp}を生起領域として、表層損失量Lを超えた雨量が流出するものとする。

$$D_{imp}(t) = I_{imp}(P(t) - L) \quad (1)$$

ここで、 D_{imp} ：不浸透域からの直接流出量(mm/day)
 $P(t)$ ：日雨量(mm/day) I_{imp} ：不浸透域面積率 L ：
 降雨時の不浸透域における損失で、屋根・道路などの初期吸収・窪地貯留と不浸透域からの蒸発量(mm/day)である。

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) 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。

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

ここで、 E_{pi} ：i月の日平均蒸発散能(mm/day)
 D_{oi} ：i月の可照時間(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_{Mii} に補正係数 e を乗じ、日単位への変換は(3)に示すその日の降雨量によって決定される重み係数 $\alpha(t)$ を用いて、(4)式により日蒸発散量 $E(t)$ を求める。

$$\alpha(t) = \begin{cases} 1.0 & P(t) = 0 \\ 0.7 & 0 < P(t) < 1.0 \\ 0.5 & 1.0 \leq P(t) < 5.0 \\ 0.4 & 5.0 \leq P(t) \end{cases} \quad (3)$$

$P(t)$ ：日雨量(mm/day)

$$E(t) = e \cdot E_{Mi} \cdot \frac{\alpha(t)}{\sum \alpha(t)} \quad (4)$$

$\sum \alpha(t)$ ：その日が属する月の α の合計 e ：蒸発散の補正係数

c) 浸透(I)・中間流(Qm)・地下水涵養(G)

浸透・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（早期の地下水位流出成分）であると仮定して地下水の早い流出成分を組み込んだ。

これまでのモデルでは、日単位の降雨を扱う場合に短時間雨量が強い場合の浸透域からの直接流出量の算定を考慮していない為、出水時の再現性が良好でない傾向があった⁵⁾。これを補う為、浸透量Iは浸透域において土地利用別日単位浸透量の上限を仮定して、これを超過

した場合には直接流出量となるように設定した。以下に計算式を示す。

$$I_l(t) = \begin{cases} P(t) & P(t) \leq R_l \\ R_l & P(t) > R_l \end{cases} \quad (5)$$

$$I(t) = \sum I_l(t) \quad (6)$$

ただし、 $P_l(t) > R_l$ の場合浸透域からの直接流出量の合計は式(7)で求める。

$$D_i(t) = \sum (P_l(t) - R_l) \quad (7)$$

ここで、 $I_l(t)$ ：土地利用別浸透量(mm/day) R_l ：日単位浸透の上限(mm) $I(t)$ ：浸透量(mm) $D_i(t)$ ：浸透域からの直接流出量(mm/day) である。

単位メッシュ内の表層水分保留量 Ms' は、浸透量 I にその前日の表層水分保留量 Ms に加えられ、Hammon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 は表層水分保留量 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、河川近傍では表層土壌水分保留量 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。

$$Ms'(t) = Ms(t) + I(t) - Ei(t) + Qj \quad (8)$$

$$G(t) = \begin{cases} 0 & Ms'(t) \leq Mn \\ \beta(Ms'(t) - Mn) & Mn < Ms'(t) \leq Mx \\ \beta(Mx - Mn) & Ms'(t) > Mx \end{cases} \quad (9)$$

$$G_m(t) = \begin{cases} 0 & Ms'(t) \leq Mn \\ 0 & Mn < Ms'(t) \leq Mx \\ \gamma(Ms'(t) - Mx) & Ms'(t) > Mx \end{cases} \quad (10)$$

$$Ms(t+1) = Ms'(t) - G(t) - G_m(t) \quad (11)$$

$$Q_m(t) = Au^2 G_m(t)^2 \quad (12)$$

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

c) 地下水流動と河川への地下水流出

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、これに加えて深層への地下水涵養を考慮して行った。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。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(KI(h-Z) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(KJ(h-Z) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + R + q_{riv} + q_{lk} = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (13)$$

ここで、 KI, KJ ： x, y 方向の透水係数(m/s)、 h ：地下水水位標高(m) Z ：不透水層(帯水層下面)の標高(m) R ：地下水涵養量(m^3/s) q_{riv} ：地下水流出量(m^3/s) q_{lk} ：深層地下水への漏水(m^3/s) 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、河川と地下水流出の関係を次式により計算する。ただし、地下水から河川への涵養のみを考慮し、河川水位は一定であると仮定した。

$$q_{riv} = l(h_{riv} - h) \quad (14)$$

$$l = \frac{k_{riv} A}{dr \Delta x \Delta y} \quad (15)$$

ここで、 q_{riv} ：地下水流出量(m^3/s) l ：河床の漏水係数(m^2/s) h_{riv} ：河川水位 h (m)：河川の存在するメッシュの地下水水位(m) h_{riv} ：河床標高(m) k_{riv} ：河床の透水係数(m/s) dr ：河床の厚さ(m) A ：河床面積(m^2) $\Delta x, \Delta y$ ： x, y 方向のメッシュ間距離(m) である。

d) 河道・表面流出

直接流出により生じる表面流出・中間流出および地下水流出により生じる河道流出は図-3に示すように、対象メッシュの標高 $H(I, J)$ の周囲の8メッシュのうち最も低い方向に流れるものとして決定された落水線に沿って水流量が累加されて流出量が計算される。

なお、DEMは対象流域内の1/2500地形図のコンター図から流域内に窪地が発生しない様に50m×50mのデータを作成する。

$H(I-1, J-1)$	$H(I, J-1)$	$H(I+1, J-1)$
$H(I-1, J)$	$H(I, J)$	$H(I+1, J)$
$H(I-1, J+1)$	$H(I, J+1)$	$H(I+1, J+1)$

図-3 標高 $H(I+1, J+1)$ が最も低い場合の落水線方向

2. 東川上流域への適用

(1) 対象流域の概要と既往の研究

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18.1km²の河川であり、図-4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は、1994年の首都圏細密数値情報(10mメッシュデータ)を用いることとし、この情報に含まれていない家屋等の屋根面積については1/2500地形図を計測して求めた。表-1は、土地利用データを50mメッシュデータに加工し、落水線図により上流堰地点での土地利用別の面積率である。流域内には雨水流出対策施設は主に浸透枿が設置されており、その対策面積は約1.4haとなっている。

表-1 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。

SMPTモデルを用いた水循環モデルは、永山試験流域、多摩ニュータウンの乞田川流域、武蔵野台地からの湧水を対象とした国分寺試験流域、東川上流試験流域に適用した研究⁵⁾⁷⁾が行われている。特に国分寺試験流域では地下水流動を含む水循環解析³⁾⁴⁾が行われており、その適合性が示されている。また、東川上流試験流域の水循環に関する研究⁵⁾においては、安藤等により地下水貯留を含めた日単位の水循環モデルの適合性について解析が行われているが、連続した降雨に対する地下水貯留量の増加が再現されないなどの課題が残されている。

(2) 水文観測

本試験流域においては、図-4に示す▽印(W1, W2, W3)において10分毎の水位および電気伝導度を観測しており、○印地点では民家の浅井戸において地下水位を観測している(井戸の位置については図-5を参照)。また、流域内の雨量観測所は上流域のほぼ中央に位置する消防署(標高90m)と流域外ではあるが気象庁所沢観測所(標高119m)があり、水循環解析にはティーセン法によって算出した流域平均降雨を用いる。

(3) 東川上流堰の水位流量曲線

東川上流堰は既往の研究⁵⁾により水位流量曲線が作成されており、これに水深45cm以上の洪水時の流量観測結果(1999年8月14~15日)を加えて修正を行い図-6に上流堰の水位流量曲線を示した。

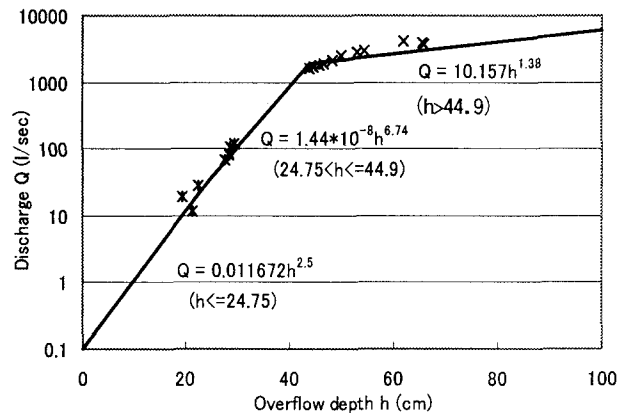


図-6 東川上流堰の水位流量曲線

(4) 人為排水の分離

東川上流域では下水道の普及は進んでいない為、家庭排水が河川水に混入していることは既往の研究により明らかにされている。人工系の流出成分には農業排水と家庭排水などが考えられるが、本流域では水田面積が1%なので、家庭排水のみを対象とする。人為排水分離方法は無降雨期間の日周変化として早朝に最低流量が出現するので、それを当日の地下水流出と見なし、最低流出量を上回る流量を当日の人為排水とした。

(5) 利用データ

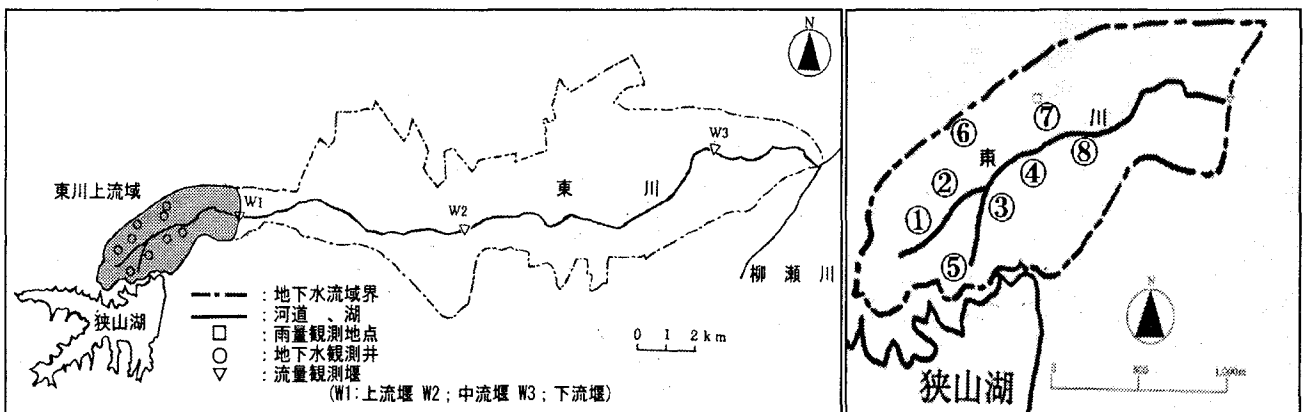


図-4 東川上流試験流域概要図

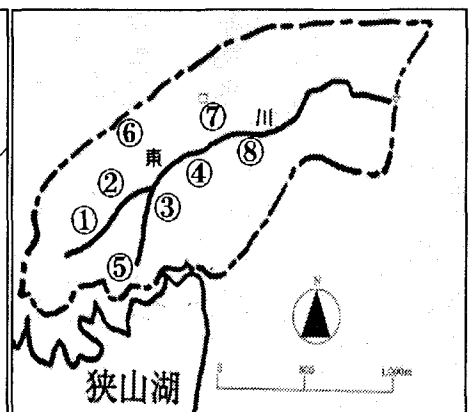


図-5 上流域の観測井位置図

表-2 解析で用いた各パラメータの値

名称	記号	値	名称	記号	値
不浸透の降雨損失	L(mm)	2.0	河川近傍での地下水涵養の比例定数	γ	0.8
蒸発散の補正係数	e	0.8	最小容水量	Mn(mm)	200
地下水涵養の比例定数	β	0.8	河川近傍での土壌水分量の最大値	Mx(mm)	210
間地の日単位浸透量の上限	R1(mm)	50	河床の透水係数	$k_{riv}(m/s)$	10^{-7}
畑の日単位浸透量の上限	R2(mm)	100	河床の厚さ	Dr(m)	0.5
森林の日単位浸透量の上限	R3(mm)	130			

なお、不浸透面積率・蒸発散面積率・有効空隙率・透水係数などについては、各メッシュに与えた。

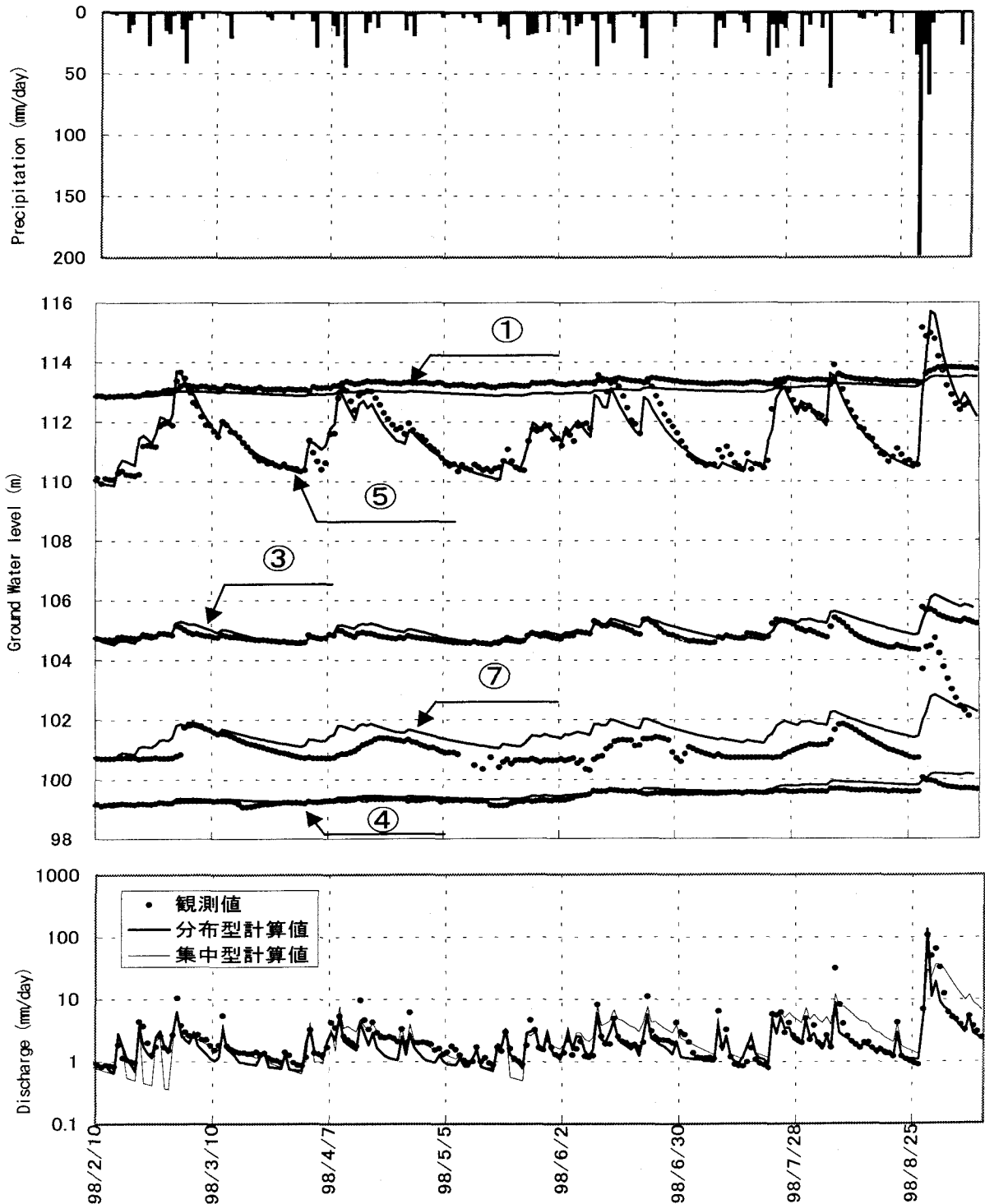


図-7 解析結果

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年程度行うのが望ましいと考えられるが、本流域では信頼できる流出量データの蓄積が少ない事や、本検討はモデル構築の初段階にある事から、対象とする解析期間は1998年2月10日～1998年9月10日までの214日間とする。

4. 解析結果と考察

上述の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結果を図-7に示す。流出高のグラフからは、3月～4月ではピーク流出高の再現性は良いものの、出水後の流出低減部において実測値を下回る傾向があるが、その他の期間においては全体的な変化傾向をよく表現している。一方、地下水位の再現についても全体的な傾向をよく表現しているが、流域界沿いの観測井⑦では実測値と異なった地下水位変動が確認されている。また、200mm/dayの降雨のあった8月後半の水位変動の表現が再現されていない。

また、流出高のグラフには集中モデルによる結果⁷⁾を示した。集中型モデルと分布型モデルの結果の比較を行うと、出水時のピーク流量については同様な再現性を示しているが、出水後や無降雨時の波形は分布型の方がより実測値を再現している。なお、ここで比較した集中型モデルは、本研究で用いているSMPTモデルを東川上流域対象に適用したものである。

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。また、本研究はモデル構築の初段階であり、以下の問題点も明らかとなった。

・モデル作成の為の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。

・流量観測データは越流堰により計測されており、これまでも出水後に土砂堆積のため、精度が十分なデータを得られないこともあったので、特に出水後の管理を行う必要がある。また、人為排水の影響を十分に反映できるような分離方法と観測などが必要である。

・日単位を基本とした水循環モデルの場合、短時間降雨による直接流出量の再現には限界があり、より精度を上げるためには、時間単位を基本としたモデルを再構築する必要がある。

・蒸発散モデルや地下水涵養モデルにおいては、土地利用状況に関係なく、一様のモデルを用いている。分布型

モデルの特徴を生かす為にも、土地利用などを指標にした蒸発散量の推定方法等を組み込む。

5. 結論と今後の課題

(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、地下水位をよく再現できることを確認した。

(3) しかし、本モデルは未完成であり、今後の課題として以下の検討が挙げられる。

- ・流域の水文観測を引き続き行い、信頼性のあるデータを用いてパラメータの同定、そしてモデルの検証を行う必要がある。
- ・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) 安藤義久・高橋裕・有賀茂・金尾健司：丘陵地の中小河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。
- 2) 安藤義久・藤村和正・小沢佳代・濱中哲彦・綱川恭弘：東川上流試験流域の水循環解析，土木学会水工学論文集，第42巻，pp193-198，1998。
- 3) 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，Vol113，No10，pp483-487，1970。
- 4) 安藤義久・虫明功臣・高橋裕：丘陵地の水循環機構とそれに対する都市化の影響，土木学会水理講演会論文集，25，1981。
- 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) 安藤義久・高橋裕・吉田秀樹・石川比呂志：台地の試験流域における地下水流動を含む水循環解析，土木学会水理講演論文集，30，pp127-132，1986。
- 7) 安藤義久・高橋裕・田村孝廣：台地の試験流域における平面2次元モデルによる地下水流動解析，土木学会水理講演会論文集，31，pp. 89-94，1987。

(2000. 10. 2受付)