

Stanford Watershed Model の流出特性 に関する検討

CHARACTERISTICS OF THE STANFORD WATERSEHD MODEL RUNOFF PROCESS

林 誠二¹・村上正吾²・渡辺正孝³

Seiji Hayashi, Syougo Murakami and Masataka Watanabe

¹正会員 工博 国立環境研究所水圏環境部土壌環境研究室 (〒305-0053 茨城県つくば市小野川 16-2)

²正会員 工博 国立環境研究所水圏環境部水環境工学研究室 (〒305-0053 茨城県つくば市小野川 16-2)

³正会員 Ph.D. 国立環境研究所水圏環境部 (〒305-0053 茨城県つくば市小野川 16-2)

A lumped conceptual model, the Stanford Watershed Model (SWM) was used to simulate the runoff processes in the small forest watershed using the observed hydrological data for both the short and long period. Model parameters were calibrated with the runoff hydrograph at rain events only. In the rain runoff events, the changes of soil water vertical distribution were simulated accurately. Moreover, the results of separation of the runoff hydrograph using the SWM showed a good correspondence with those using SiO_2 as tracer. For the long period calculation, the changes of simulated upper zone storage and active groundwater storage on the SWM had the similar periodicity to those of soil water matric potential at 20cm depth and 160cm depth, respectively. However, the runoff hydrograph and lower zone storage could not be simulated well, which suggests that it is necessary to improve each estimation method for the snowmelt process and the evapotranspiration process on the SWM.

Key Words : conceptual watershed model, runoff process, separation of runoff hydrograph, soil water distribution

1. はじめに

森林や農地、都市、河川、沿岸域等の各領域を総合的に捉え、流域一体となった水資源保全や発生汚濁負荷の削減と水域の水質、生態系の保全を進めていく上で、広域モニタリングの整備とともに、流域内での水・物質動態を定量的に推定し得る数学モデルの利用は不可欠である。水の量だけでなく質を対象とした流域スケールでの数学モデルに関して、欧米諸国ではこれまでに数多くのモデルの提案と利用がなされている。その代表的なものとして、SWM(Stormwater Management Model), HSPF(Hydrological Simulation Program FORTRAN), AGNPS(Agricultural Nonpoint Source Pollution Model)等が挙げられる。なかでもHSPFは非特定汚染源として多様な土地利用形態を取扱う事が出来ること、水質項目として栄養塩や農薬、BODやCODといった有機物指標ならびに動植物プランクトン等、幅広く扱うことが可能であること、さらには時間スケールとして降雨時だけでなく晴天時も対象としていることから、流域内の総合的な水質管理に適した体系化モデルであり、様々なスケールの流

域へ適用した事例が数多く報告されている^{1)~3)}。

HSPFにおける降雨流出過程の表現には、CrawfordとLinsley¹⁾によって開発されたStanford Watershed Model IVのサブプログラムLANDが用いられている。SWMは水文モデルとしては集中型概念モデルに分類されるが、得られる出力は流域出口における流出水量だけでなく、概念的ではあるが、土壌鉛直深さ方向における水分変動や流出成分毎の流出水量の算定も出来る。

流域環境管理研究における数学モデルの利用に際しては、その目的に応じたモデルの選択が必要となる。主な研究課題の一つである土地利用の改変が流域内の水・物質動態に及ぼす影響を検討するためには、キネマティックウェイブ理論に基づいた流出計算に代表されるように、流出過程における流域内部の物理応答を再現しつつ流域全体の流出水量を求められる分布型物理モデルの利用が本来望ましい。しかしながら、このような物理モデルを大流域に分布型として十分な精度を保ちながら適用し、さらに、多項目の水質成分を取扱うことは、今日の計算機の進歩をもってしても煩雑かつ莫大な時間を必要とする。そこで、実際には、SWMに代表されるように概念モデルの利用が考えられる。その際、モデルには、流域全体

の流出水量に加えて内部の物理的な応答についての再現計算が可能であり、その結果が対象場の平均的な物理応答に対応していることが、少なくとも必要とされる。SWMは上述のように、流域内部の概念的な応答を表現し得る。しかし、実際の物理応答との対応については不明な点も多く、その点について検討した事例もない。今後、SWMを流域水文モデルとして大流域へ積極的に活用していく上でも、その検討は必要とされる。

以上から本研究では、SWMによる流出特性の再現計算が短期・長期それぞれにおいて、対象場における時空間平均としての流出事象や土壌水分分布をどの程度正確に表現しているか、小流域での流出過程の観測結果を用いて比較検討を加えたので、ここに報告する。

2. 現地観測の概要

(1) 対象流域

本研究の解析対象は、仙台市作並の広瀬川水系元木沢流域である。流域の概要を図-1に示した。流域の平均標高は538m、平均勾配及び斜面長はそれぞれ0.634、437mである。主な植生は、コナラや楓等の落葉広葉樹であり、また、表層土壌は褐色森林土壌である。土壌の層位構造としては、落葉落枝(A₀層)の下に順に10~20cm厚の腐植土壌層(A層)、60~80cm厚の鉍質土層(B層)が形成されており、それより以深には基岩である緑色凝灰岩の強い影響を受けた母岩層(C層)が存在する。

(2) 観測方法

調査期間は1994~1995年の2年間である。降水は一雨降雨毎に採取し水質測定を行った。斜面鉛直深さ方向での土壌水分分布を測定するために、図-1に示した地点で深さ10cm、20cm、70cm、160cmにそれぞれ自記式テンシオメーター(DIK-3020、大起理化学工業)を設置し10分間隔で連続観測を行った。また、土壌水質の測定のために土壌水採取器(DIK-3900、大起理化学工業)をテンシオメーターと同じ鉛直深さ数点に設置し、週に一度採取した。流域からの流出水量は図-1に示した地点で圧力型水位計により10分間隔で水位を連続観測し、予め求めたH-Q式により渓流量として算出した。また、渓流水質測定のために、出水時には流出水量の増減に応じて連続採水を行い、平時時には週2回程度の定期採水を行った。また、採取した各試料水中のSiO₂濃度をテクニコンオートアナライザーによって測定した。

(3) SiO₂を用いた流出成分分離手法

一般に水質をトレーサーとした流出成分の分離は、出水時における降水の質的、量的影響を直接受けた成分(新水)と基底流出成分も含めた土壌中からの押出し成分(古水)とに流出水量を分ける手法である。水質流出現象に

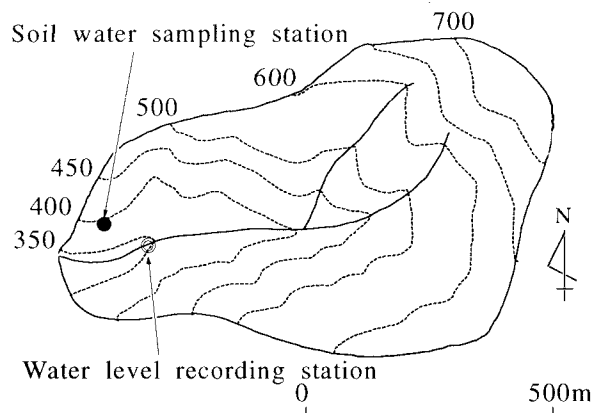


図-1 元木沢流域の概要

において質量保存の関係が成り立つならば、以下の式から分離が可能となる。

$$Q_t = Q_o + Q_n \quad (1)$$

$$C_t Q_t = C_o Q_o + C_n Q_n \quad (2)$$

$$Q_o = \frac{(C_t - C_n)}{(C_o - C_n)} Q_t \quad (3)$$

Q_t, C_t : ある時刻における総流出水量とその水質濃度,

Q_o, C_o : 古水の流出水量と水質濃度

Q_n, C_n : 新水の流出水量と水質濃度

溶存態二酸化珪素(以下SiO₂と略述)は通常降水中にほとんど含まれず、土壌水中において土壌との接触時間に応じて濃度上昇を示す特性を有する。これはSiO₂が水質トレーサーとして、流出過程における新水流出成分と古水流出成分とを明確に分離し得ることを示している。上記(3)式より、流出成分の分離には、総流出水量に加えて新水と古水の水質濃度が必要である。ここでは、新水のSiO₂濃度、 C_n として、分離対象となる降雨流出時に採取した10cm深での土壌水SiO₂濃度(2.908mg/l)を用いた。また、古水のSiO₂濃度、 C_o は、基底流出と押出し流出、両成分の混合割合により変動し、見かけ上、流出水量に依存すると考えられる。そこで、志水⁵⁾や林ら⁶⁾が用いた方法に準じ、流量とSiO₂負荷量の関係から古水SiO₂濃度について以下の式を導き出し、分離計算に用いた。

$$C_o = 10^{1.31Q_t - 0.117} \quad (4)$$

3. 流出過程のモデル化

(1) Stanford Watershed Model における降雨流出過程

図-2にSWMのフローダイアグラムを、表-1に流出過程におけるモデルの主要なパラメータを、それぞれ示した。流出過程の特徴は、土層は鉛直深さ方向に上層、下層、地下滞水層の3層に区分され、各層の水分状態によって

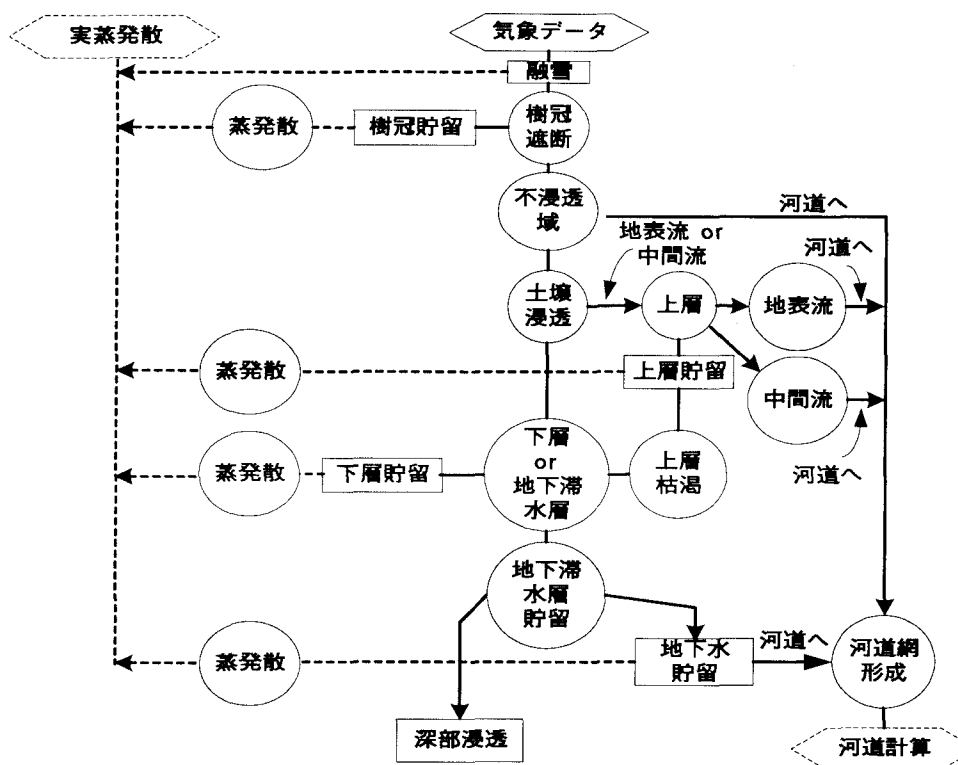


図-2 Stanford Watershed Model のフローダイアグラム⁴⁾

流域斜面での水分量が決定される点である。特に、上層と下層を表わす指標値、UZSN と LZSN が設定され、水分量と指標値との比を用いて、雨水の土壌浸透能や蒸発散量の時間的な変動を算定する。この時に、各計算時間毎に土壌浸透能を超過した降水は、直接流出に関わるポテンシャル量と見なされ上層、下層の水分状態に応じて上層への貯留、表面流貯留、中間流貯留の各貯留層へ分配される。また、土壌浸透水も下層の水分状態によって下層と地下滞水層へ分配される。流出成分は表面流出、中間流出、地下水流出の3つが考慮され、各流出量はそれぞれ上記の各貯留層における貯留量の非線型な関数として求められる。なお本研究では、SWM による流出過程の計算結果を検討するために、その主要部分を組み込んだ HSPF Ver. 11⁶⁾ のモジュール PWATER を用いた。

(2) 積雪・融雪過程

積雪・融雪過程を再現するために、HSPF ver. 11 に組み込まれているモジュール SNOW を使用した。その特徴として、降水量、気温、全天日射量、露天温度及び風速の5つの気象観測データを用いた熱収支計算に基づき、降雪過程や積雪部と氷結部の2層構造からなる積雪及び融雪過程を表す点が挙げられる。また、降雪から積雪、融雪に至る各過程の表現については、モデル作成時期が1960年代と古いこともあり、経験則に依存しており、必然的に、与えるべきパラメータも概念的なものである。

(3) 元木沢流域への適用

元木沢流域全体を一つの水文応答単位として、SWM の

表-1 SWM(HSPF)における流出過程の主要パラメータ

Parameter	Description	Units
INFILT	Infiltration	mm/h
IRC	Interflow recession parameter	d ⁻¹
INTFW	Interflow inflow parameter	none
UZSN	Upper zone nominal storage	mm
LZSN	Lower zone nominal storage	mm
LZETP	Lower zone ET parameter	none
AGWRC	Groundwater recession rate	d ⁻¹
KVARY	Groundwater recession flow	mm ⁻¹
INFEXP	Exponent in the infiltration equation	none
INFILD	Ratio between the maximum and mean infiltration capacities	none

適用が行われた。計算の実施に際して必要となる斜面勾配、斜面長等の地形特性を表わすパラメータは、GIS を用いて、国土地理院発行の 50m メッシュ数値標高地図から流域全体の平均値をそれぞれ求めた。また、調査結果を基に流域の平均土壌層厚は、A 層（上層）を 15cm、B 層（下層）を 80cm とし、森林土壌の構造と水分分布特性に関する知見⁷⁾から、各層に対応するパラメータ UZSN と LZSN をそれぞれ 30mm と 160mm とした。モデルへの入力値となる気象データは、時間別の降水量、気温、風速、短波放射量、露点温度、可能蒸発散量である。降水量、気温及び風速は AMeDAS の新川観測所の記録値を、短波放射量と露点温度は気象庁による仙台での地上気象観測結果を、それぞれ用いた。可能蒸発散量には、便宜的に Penman 法により求めた可能蒸発量を与えた。再現計算は計算間隔を 1 時間とし、1994、1995 年の 2 年間を対象に行なった。その際、入力データを予め繰り返し与えることによって、

設定した初期値の影響を除いた。

4. 結果及び考察

(1) 降雨時流出応答特性についての比較検討

1994年9月21日から10月3日にかけて行なった観測結果が、降雨を起因とする短期的な流出特性に関するSWMの再現計算結果を検証するために用いられた。ここでは、考慮すべき流出特性として総流出水量、土壌水分量、流出成分流出水量を取扱った。検証の手順としては、まず流域全体の流出水量について再現性を検討し、最適解を得るモデルパラメータを決定した。次に、そのパラメータを用いて各層での土壌水分量や各流出成分毎の流出水量を算定し、それぞれ対応する観測値との比較検討を行った。

a) 総流出水量の比較

9月23日から9月26日かけて観測された2回の出水による2つのハイドログラフを用い、パラメータのキャリブレーションを行なった上で、9月30日から10月2日にかけて観測された大規模な降雨時流出水量の計算結果の再現性を検討した。図-3に計算結果と観測値それぞれを流出高として示した。モデルによって、連続した二つの異なる規模の降雨時における流出水量の変動が、十分に再現されていることが分かる。また、パラメータの一つである土壌浸透能を意味するINFILTの値は、キャリブレーションの結果240mm/hとなり、森林土壌として妥当な値となった。さらに、大規模出水時の流出水量の計算結果は、ピーク後の通減状態を十分に再現出来ていない事に検討の余地を残したが、短期間に生じた2つの出水ピークの発生時間と高さを適確に再現しており、総体的には、SWMが降水による短期間の急激な流出水量の変動を精度良く計算し得ることを確認出来た。

b) 土壌水分変動の比較

図-4に9月27日から10月3日にかけての降雨流出時における上層、下層、地下滞水層の水分変動を示した。上、下層については算定された貯留高を各平均土壌層厚で除することにより体積含水率を、地下滞水層については貯留高をそのまま用いた。また、観測値については、SWMの各層に対応する深さとして20cm深、70cm深、160cm深を選び、土壌水分ポテンシャルとして圧力水頭の常用対数値をとったpFを用いてそれぞれ示した。pF値は土壌が同じであれば水分量だけに依存し、水分量と負の相関がある。但し、テンシオメーターの設置場所が、比較的土壌が乾燥し易い斜面上部であったため、pF値は流域全体の平均値より高い値を示していたと考えられる。図から上、下層でそれぞれ算定された体積含水率は、森林土壌における値として、現実的な範囲で推移していると言える。各層毎の計算値と観測値と比較に関しては、両者の変動が、それぞれ土壌水分の異なる性質を表わしている

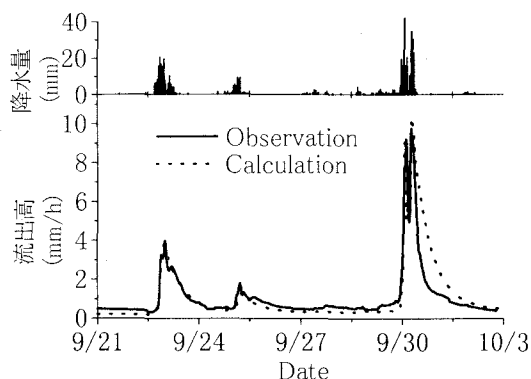


図-3 降雨時流出水量の再現計算結果

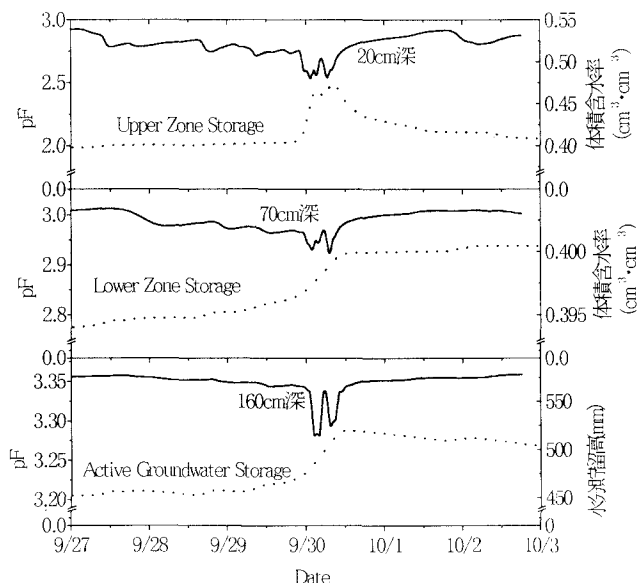


図-4 降雨時の各土壌深さでの水分変動再現計算結果

ことを考慮する必要がある。すなわち、pF値の急激な低下は、土壌中における下向きの水分移動フラックスの発生を表わすのに対し、計算値は水分貯留量の増減を表わしている。図-4において、下層や地下滞水層での計算値は、pF値が急激に2回低下した期間全体に渡り、緩やかに増加する結果となった。これは、各土壌深さで下向きの水分移動フラックスが発生したことに伴い、対応する深さでの水分貯留量の増加を再現していると言える。上層についても、pF値の低下、すなわち、雨水浸透に伴う上層への流入フラックスの発生に対応し、計算値である体積含水率は増加している。更に、モデルの構造として、上層での余剰貯留水分は、速やかに蒸発量もしくは下層への浸透量として扱われるため、体積含水率は急激に低下し、pF値の速やかな増加とよく対応する結果となった。以上から、SWMの各層における土壌水分量算定値の時間変化は、下向きの水分移動フラックス発生に対応しており、降雨流出時に実際に生じた土壌水分量の変動を十分に再現していると考えられる。

c) 流出成分分離結果の比較

SiO₂をトレーサーとした流出水量の成分分離を9月27日から10月3日の降雨流出現象に適用した。

図-5 に分離結果を SiO_2 濃度の経時変化とともに示した。

SWM による流出成分の分離に関して、SWM での本来の定義では表面流及び中間流は、直接流出成分とされているが、SWM での中間流出量を表した (5) 式に見られるように中間流は、中間流貯留部への流入成分の直接流出と中間流貯留成分の押し出し流出から形成される。

$$\text{IFWO} = (\text{IFWK1} \cdot \text{INFLO}) + (\text{IFWK2} \cdot \text{IFWS}) \quad (5)$$

IFWO：中間流出量 (mm/h)
INFLO：中間流貯留部への流入量 (mm/h)
IFWS：中間流貯留量 (mm)
IFWK1, IFWK2：係数

IFWK1 と IFWK2 は、表-1 に示した中間流の通減状態を規定するパラメータ IRC を基に、計算過程で算出される係数である。ここでは表面流と (5) 式右辺第 1 項の和を新水流出成分、地下水流出成分と (5) 式右辺第 2 項の和を古水流出成分、とそれぞれ見なして成分分離計算を行った。図-6 にその結果を示した。両手法の流出成分分離に関する定義が本来異なるため、各成分毎のハイドログラフは一致していない。しかし、流出水量の最初の急激な増加時に新水流出成分が古水流出成分を上回る事や、2 度目のピーク時に古水流出成分の寄与が卓越する点等、全体的な傾向として SWM による分離結果は、観測値を基にした水質トレーサによる結果と類似することを示した。また、水質トレーサにより新水流出成分が検出された期間中の、総流出量に新水流出が占める割合は、水質トレーサで 23.1%、SWM において 19.2%と、概ね一致する結果となった。以上から短期的な降雨時の流出過程に関して、SWM は元木沢流域における流出特性を再現し得ることが明らかとなった。

(2) 長期流出特性についての比較検討

1995 年 1 月から 9 月の流出水量及び土壌水分分布の連続観測結果が、SWM による長期流出特性の再現性を検証するために用いられた。計算を行うにあたり、モデルの各パラメータの値は、降雨時流出特性の検討で得られた値をそのまま同じく用いた。

a) 流出水量の比較

図-7 に、再現計算結果及び観測値それぞれの時間平均値に対する 24 時間移動平均値を示した。各ハイドログラフの比較から、各出水時でピークの高さに差違はあるが、ピークの発生時期に関しては、3 月下旬の融雪期を除き高い再現性を示した。一方、平水時の流出水量計算値は 3 月中旬以降、観測値を絶えず下回る値を示し、特に、4 月上旬から 5 月中旬にかけてその差は顕著であった。モデルが融雪に伴う土壌水浸透過程での地下水涵養を、正確に再現していない事が原因として考えられる。

b) 土壌水分変動の比較

各土壌深さでの水分変動に関する時間平均データから

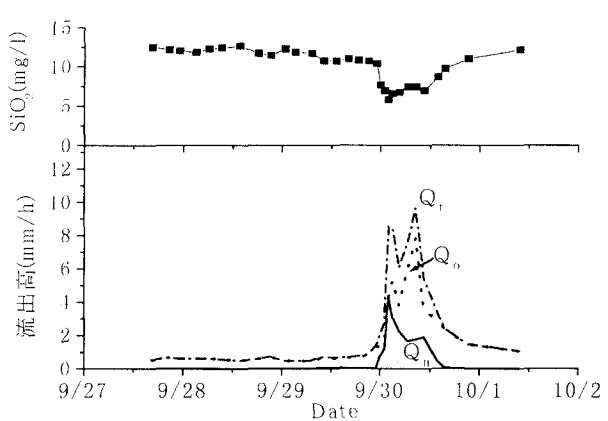


図-5 SiO_2 をトレーサとした流出成分分離結果：
 Q_t :総流出水量、 Q_n :新水流出成分、 Q_o :古水流出成分

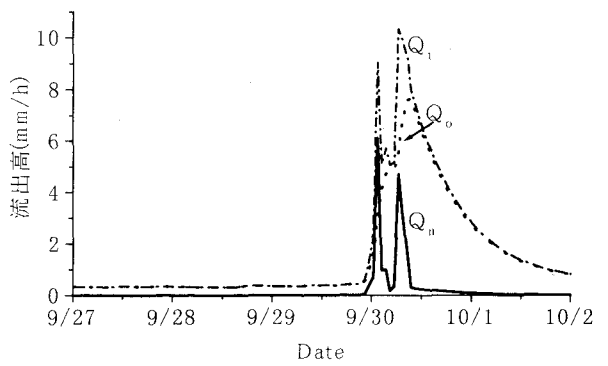


図-6 SWM による流出成分分離結果：
 Q_t :総流出水量、 Q_n :新水流出成分、 Q_o :古水流出成分

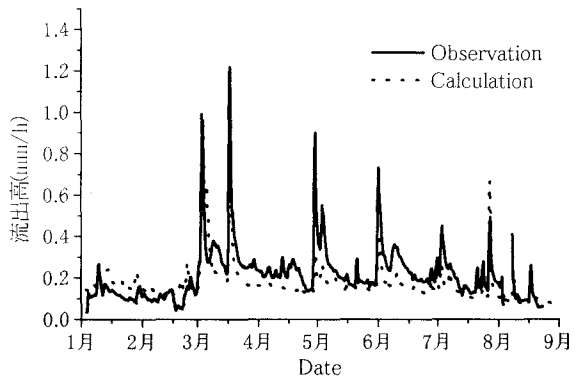


図-7 流出水量の再現計算結果(1995 年 1 月～9 月)

24 時間移動平均値を求め、図-4 と同じ形式で計算値と観測値を図-8 に示した。上層、地下滞水層については、融雪期に相当する時期を除いて、計算値は pF 値の急激な低下と緩やかな増加に対して、それぞれ急激に増加し緩やかに減少する傾向を示した。特に、良い対応を示した 6 月中旬から 9 月中旬の 3 ヶ月間について、単回帰分析を行なったところ、上層で-0.85、地下滞水層で-0.74 と、両者は高い負の相関を有する結果を得た。一方、下層での計算値である体積含水率は、期間全体にわたって、観測値の変動とほとんど対応しない結果となった。上層や地下滞水層での水分量計算値が、融雪期に観測値と対応し

ないことも含めた、このようなモデル出力の再現性の低さは、SWMにおいて融雪過程や蒸発散過程が十分に表現され得ないことが原因と考えられる。まず、融雪過程については、SWMの積雪及び融雪の各過程が経験則に依存し、森林流域の起伏に富んだ地形を要因とする積雪・融雪の面的な不均一さを十分に再現出来なかったことが推測される。しかし、対象流域での積雪深や密度分布等の観測値を有していないため、この点については現段階で十分に検証するに至っていない。次に、蒸発散過程については、SWMにおける実蒸発散量の算定が、各計算ステップ毎に、入力データである可能蒸発散要求量を満たすように、まず上層からの蒸発散量が求められ、残りの要求量に対して下層からの蒸発散量が求められる段階的な手順をとる。この時、各層からの蒸発散量は、水分状態に依存する。このため、可能蒸発散量が比較的少なく、上層の水分状態が飽和状態に近ければ、上層のみで蒸発散要求量はほぼ満たされてしまう事になり、下層の水分量はほとんど影響を受けない。実際に、モデルにより算定された4月から9月にかけての総蒸発散量の内訳は、上層から約200mm生じたのに対し、下層からはその10分の1にも満たない量であった。しかしながら、元木沢流域のような森林域では、下層にまで張り巡らされた樹木根系を經由した蒸散が、表層土壌での蒸発散と同期して発生し、図-8のpF値に見られるように、上、下層ともに水分変動が生じる。これが、下層での計算結果の時間変化が観測で得られた変動を再現し得なかった具体的な原因と言える。また、この再現性の低さは、下層の水分状態によって決定される単位時間当たりの直接流出成分や、土壌浸透量に大きな影響を与えており、結果として図-7に見られる観測値とのピーク高さの不一致や、平水時流出水量の再現性にも影響を与えたことを示唆している。

5. まとめ

集中型概念モデルStanford Watershed Model (SWM)を小流域へ適用し、観測値との比較からSWMによる流出の物理過程に対する再現性を短・長期それぞれについて検討した。短期的事象である降雨流出時において、総流出水量はモデルにより十分に再現され、さらに土壌各深さでの水分変動や流出成分分離結果は、SWMが出水時における流出の物理過程を概ね再現出来る事を示した。一方、長期的な流出特性に関して、算定された上層及び地下滞水層での水分変動が、実際の土壌水分分布を概ね再現していたのに対して、計算時に融雪過程や森林土壌からの蒸発散過程を十分に表現し得なかった。このため、下層水分量や流出水量の変動を十分に再現する事が出来なかった。今後、SWMを流域水文モデルとして積極的に活用していくには、融雪及び蒸発散についてパラメータ値の再設定だけでなく、プログラム自体の改良も考慮に入れた

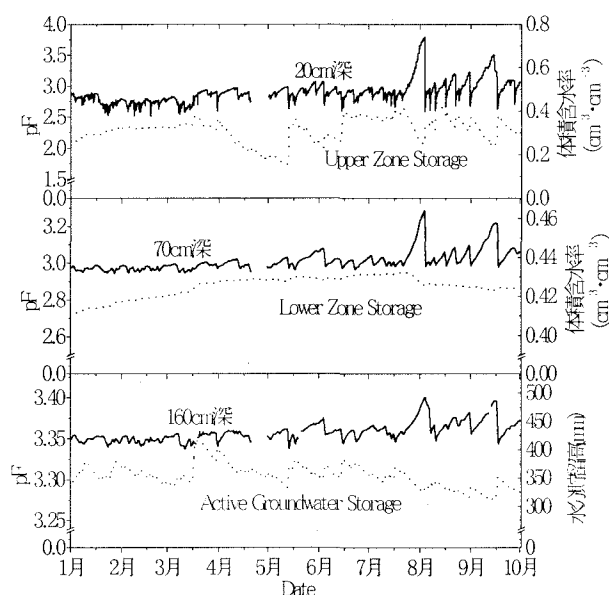


図-8 土壌水分変動の再現計算結果(1995年1月～9月)

検討を進めていく必要があると言える。

参考文献

- 1) Bicknell, B.R., Donigian, A.S. and Barnwell, T.A.: Modeling water quality and the effects of agricultural best management practices in the Iowa river basin, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 17, pp. 1141-1153., 1989.
- 2) Larry W.M., Chee Y.C., Roger H.S. and Surya S.: Modeling of best management practices on North Reelfoot Creek, Tennessee, *Water Environment Research*, Vol. 64, No. 3, pp. 241-247, 1992.
- 3) Laroche, A.M., Jacques G., Robert L. and Alain P.: Simulating atrazine transport with HSPF in an agricultural watershed, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 122, No. 7 pp. 622-630, 1996.
- 4) Crawford, N.H. and R. L. Linsley: Digital simulation in hydrology: Stanford Watershed Model IV, *Stanford Univ., Dept. Civ. Eng. Tech. Rep.* 39, 1966.
- 5) 志水俊夫: 電導度による融雪流出成分の成分分離と融雪流出過程に関する研究, 森林総合研究所研究報告, 第 359 号, pp. 123-140, 1990.
- 6) 林誠二, 後藤光亀, 須藤隆一: 融雪期の森林域における溶存態有機物の流出特性, 環境工学研究論文集, 第 32 巻, pp. 171-178, 1995.
- 7) Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L., Donigian, A.S. and Johanson, R.C.: Hydrological Simulation Program—Fortran, User's Manual for Version 11: U.S. EPA, EPA/600/R-97/080, 755 p., 1997.
- 8) 塚本良則編: 森林水文学, 文永堂出版, p. 35, 1992.

(1999.9.30 受付)