

表面流の発生機構を考慮した斜面多層降雨流出計算 手法に関する研究

A STUDY ON MULTILAYER RUNOFF ANALYSIS METHOD CONSIDERING THE GENERATION OF OVERLAND FLOW

呉修一¹・山田正²・吉川秀夫³

Shuichi KURE, Tadashi YAMADA and Hideo KIKKAWA

¹ 学生員 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

² 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

³ 正会員 工博 河川環境管理財団 研究顧問 (〒104-0042 東京都中央区入船 1-9-12)

The purpose of present study is to clarify runoff mechanism and to understand hydraulic processes in mountainous basins. Considering multilayer flow in a slope, generation of overland flow for large scale flood is important. The method of multilayer runoff analysis which can calculate overland flow, subsurface flow and vertical infiltration flow based on soil property and rainfall form is newly proposed in this paper. Characteristics of overland flow in mountainous basins can be expressed rationally using our method. A method is applied to the *Kusaki* dam basin (254km²). The results of runoff analysis match well with the observed data in *Kusaki* dam basin and overland flow is expressed for peak time in a large scale flood.

Key Words: Multilayer runoff analysis method, Overland flow, Subsurface flow, Vertical infiltration flow

1. はじめに

流域に降った雨水がどのような経路をたどり、どのような変換作用を受け流域末端にまで達するかという問題は水循環そのものであり、水文学において従来から精力的に研究されている。降雨流出経路としては斜面鉛直方向のみを考えた場合でも表面流、鉛直浸透流、中間流、地下水流等があり非常に複雑な機構を有している。

降雨流出経路に着目し物理的背景に基づく研究は、Horton¹⁾から始まりこれまでに多くの観測、見解により著しい発展がなされている。Horton¹⁾は降雨流出過程を土壌の浸透能を超えた降雨量が、表面流として全流域から流出するものとして扱った。これに対して、Tsukamoto²⁾は試験地での実測により、斜面での短期流出は地表流よりも中間流が卓越するという観測結果を得た。Hursh³⁾も同様の観測結果を得ている。これらにより、直接流出の主成分は早い中間流と呼ばれる斜面表層の流れであり、表面流の発生は稀であるということが示された。

しかしながら、大規模出水時には河川近傍の飽和面近くにおいて表面流の発生が考えられ、流域全体から表面流が生じるのではなく、流域の一部から表面流もしくは直接流出全体が生じるという考えが可能である。

Betson⁴⁾は降雨量が流域の浸透能を超過したとき一部の飽和域から流出は生じるという部分流出寄与域 (Partial source area) の考えを提案した。Hewlett⁵⁾は流出寄与域が降雨とともに変動して拡大、縮小し、流域流出量の変動に対応するという変動流出寄与域 (Variable source area) の考えを提案した。それに先立ち高棹⁶⁾は表土層内をダルシー型の中間流領域とみなし、水深が表土層を超える時表面流が生じこれを kinematic wave として取り扱い、流出過程を総合的に表現する解析的方法を確立している。これは、Betson⁴⁾、Hewlett⁵⁾が提案する部分流出寄与域の考え方を理論的に説明したものと認められる。現在直接流出は 0 次、1 次河川程度の溪流近傍の飽和面近くで発生すると考えられている。

従来から流出成分分離の問題に関して、多段タンクモデルを用い表現する手法が提案されている。吉川⁷⁾は、一つのサブシステムとして逓減特性の異なるタンクを考え、それぞれのタンクの逓減率として、流域固有の標準逓減曲線を用いる多段多列タンクモデルを提案している。これにより、表面流、中間流、地下水流を減衰率の異なる一つのタンクから表現し、ハイドログラフの逓減特性を考慮した流出成分分離モデルを提案している。

このように、多段タンクを用い斜面鉛直方向成分の相

違を表現する試みの他に、高棹⁶⁾の表面流・中間流モデルのように斜面流下方向流れをKinematic Waveとして取り扱いつつ斜面多層を考慮する試みもなされている。立川ら⁸⁾は土壌水分量を考慮し、高棹の手法に飽和・不飽和流れの機構を導入することにより物理過程に基づく流量流積関係式を提案している。立川らの手法は斜面流下方向流れを対象としているが、斜面多層構造として不飽和、飽和浸透流および表面流を考慮している。

このように、降雨流出経路として表面流、鉛直浸透流、飽和・不飽和浸透流、地下水流等が存在し、それらを考慮した降雨流出解析手法の提案が行われている。しかしながら、流域土壌内の複雑性に起因し、どのような土壌・地形条件および降雨形態で表面流が発生するかは未だ不明であり、定性的な評価はできていない。本論文では流域の最小単位として単一斜面を考え、単一斜面における土壌・地形特性に基づく降雨流出計算手法を提案し、土壌・地形特性および降雨形態のみから表面流、飽和・不飽和浸透流、鉛直浸透流を表現可能な斜面2層流れを考慮した降雨流出計算手法を提案する。

2. 単一斜面における降雨流出の基礎式の導出及び流出パラメータの物理的意味

著者ら^{9), 10)}は従来から斜面における流下方向流れをKinematic Waveとして扱い、単一斜面における集中定数方程式を導出している。以下にその理論概要を示す。一般化した運動則(1)式を連続式(2)式に代入し単位幅流量 q について整理すると(3)式の表面流に関するkinematic wave方程式が得られる。

$$v = \alpha h^m, q = vh = \alpha h^{m+1} \quad (1), \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \quad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + a q^{\frac{m}{m+1}} \frac{\partial q}{\partial x} = a q^{\frac{m}{m+1}} r(t) \quad (3)$$

ただし、 $a = (m+1)\alpha^{\frac{1}{m+1}}$ 、ここに、 v :断面平均流速[mm/h]、 h :水深[mm]、 $q(t)$:単位幅流量[mm²/h]、 $r(t)$:有効降雨強度[mm/h]、 m :流出パラメータ(抵抗則)、 α :流出特性を表すパラメータである。また、流出パラメータ α と m に関して、斜面流として土壌内の流れを対象とする場合(4)、(5)式に示すよう土壌、地形特性から決定される。

$$\alpha = \frac{k_s i}{D^{\gamma-1} w^{\gamma}} \quad (4), \quad \gamma = m+1 \quad (5)$$

ここに、 i :斜面勾配、 D :表層土層厚、 γ :土壌の透水性を表す無次元パラメータ、 k_s :飽和透水係数、 w :有効空隙率である。

ここで、斜面長は実地形上の斜面長にくらべ十分短いものとする、相似則として(6)式の変数分離形の近似式が成立する。 $q(x,t) = xq_s(t)$ (6) ここに q_s :流出高[mm/h]である。斜面長 L の末端で考え $x=L$ とし、(6)式を

用い整理すると(3)式は(7)式の流出高に関する常微分方程式に変形できる。

$$\frac{dq_s}{dt} = a_0 q_s^{\beta} (r(t) - q_s) \quad (7)$$

$$\text{ただし、} a_0 = aL^{\beta-1} = (m+1)\alpha^{\frac{1}{m+1}} L^{\frac{-1}{m+1}} \quad (8), \quad \beta = \frac{m}{m+1} \quad (9)$$

(7)式は単一斜面における降雨流出を表す基礎式となる。斜面流下方向流れを表面流として扱う場合はManning則をとり、 $m=2/3$ の値を用い、地下水流として扱う場合は飽和ダルシー則をとり、 $m=0$ の値を用い流出形態の相違を表現する。運動則を一般化した(1)式とし、流出形態を水深のべき乗則、つまりは抵抗則 m の値を用いて表現する。

3. 斜面多層流れを考慮した降雨流出計算手法

著者らが従来から提案している降雨流出を表す集中定数方程式(7)式は斜面鉛直方向に対して1層を考慮している。斜面における降雨流出経路としては表面流、飽和・不飽和浸透流、地下水流等があり、大規模出水もしくは地下水流を考慮した流出計算を行うためには斜面内流れを多層構造として扱う必要がある。ここで、表面流の発生機構には大きく分けてHortonタイプ¹⁾のものと高棹タイプ⁶⁾の二つの機構が存在する。本論文ではこの2つのタイプの表面流の発生を集中定数方程式に取り込み、斜面多層流れを考慮した降雨流出計算手法の提案を行う。

(1) 高棹タイプの表面流の取り込み

高棹タイプの表面流とは表層土層の下に不透水層もしくは透水係数の非常に小さな難透水層があり、地表面に到達した雨水が鉛直浸透し不透水層上面で飽和に達したのち側方浸透流として斜面流下方向に流れ出し、斜面末端付近で流れの水深が表層土層厚を超えた時点以降から表面流が発生する。上述した降雨流出の基礎式である集中定数方程式を用い表現すると以下ようになる。

$$\begin{cases} \frac{dq_s}{dt} = a_0 q_s^{\beta} (r(t) - q_s) & q_r = q_s \quad (0 \leq h \leq D) \\ \frac{dq_s}{dt} = a_s q_s^{\beta_s} (r(t) - q_0 - q_s), q_0 = q_s|_{h=D}, q_r = q_s + q_0 \quad (h > D) \end{cases} \quad (10)$$

ここに、 q_s :飽和・不飽和浸透流に関する流出高[mm/h]、 q_s :表面流に関する流出高[mm/h]、 q_r :全流出高[mm/h]、 q_0 :鉛直浸透流である。表面流はマニング則をとり、抵抗則 $m=2/3$ 、 $\alpha = i^{1/2}/n$ で表され、表面流に関する流出パラメータ a_s および β_s が決まる。ここで、 n は斜面表層におけるManningの粗度係数である。水深が表層土層厚に達した後の飽和・不飽和浸透流としては、その時点での流出高一定値 $q_s|_{h=D}$ をとる。よって、表面流の発生以降、鉛直浸透流は飽和・不飽和側方流として出て行く分だけ浸透する。

(2) Hortonタイプの表面流の取り込み

Hortonタイプの表面流とは、降雨強度が土壌の浸透能を超えた時点から、土壌表面に湛水が発生し表面流が生じる場合である。このような場合には降雨の鉛直浸透と土壌表面に発生する湛水深の関係が重要である。藤田・日野・山田¹¹⁾らはGreen-ampt理論に基づき(11)式の運動方程式、(12)式の連続式から鉛直浸透量と湛水深の関係に対して無次元化を行うことにより解析解としての降雨の鉛直浸透式(13)式を提案している。

$$\frac{dq_0}{dt} = (R - q_0) \frac{q_0 - K_s}{h_s + h_k} - \frac{q_0}{(\theta_s - \theta_i) K_s (h_s + h_k)} \quad (11)$$

$$\frac{dh_s}{dt} = R - q_0 \quad (12)$$

$$\begin{cases} q_0 = R & (0 \leq t \leq t_p) \\ q_0 = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \frac{(\theta_s - \theta_i) h_k}{t k_s}} \right\} k_s & (t_p \leq t) \end{cases} \quad (13)$$

$$t_p = \frac{h_k (\theta_s - \theta_i) k_s}{R(R - k_s)} \quad (14)$$

ここに、 R : 降雨強度[mm/h], h_s : 湛水深, h_k : 湿潤線での毛管負圧[cm], t_p : 湛水開始時刻である。この(13)式は一樣土質、一定降雨のもとで時間一浸透能曲線が土壌特性から表現されており、表面流と飽和・不飽和浸透流の関係が土壌特性に基づき連結される。また、不飽和浸透理論との比較から不飽和水分移動を考慮し湛水発生時刻 t_p も(14)式に示されるよう、土壌・降雨特性から決定される。以上により、(15)式に示すよう、鉛直浸透流に関する運動方程式、連続式を考え表面流、飽和・不飽和浸透流、鉛直浸透流、湛水深に関する4元連立常微分方程式を解くことにより、Hortonタイプの表面流の発生機構を考慮した流出計算を行うことが可能である。また、現象の一例として降雨強度一定を想定した場合は鉛直浸透流に関して(13)式に示す解析解を用いることが可能であり、より簡易な実用式として用いることができる。

$$\begin{cases} \frac{dq_s}{dt} = a_s q_s^{\beta_s} (r(t) - q_0 - q_s) \\ \frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^{\beta} (q_0 - q_*) \\ \frac{dq_0}{dt} = (r(t) - q_0) \frac{q_0 - K_s}{h + h_k} - \frac{q_0}{(\theta_s - \theta_i) K_s (h + h_k)} \\ \frac{dh_s}{dt} = r(t) - q_0 \end{cases} \quad (15)$$

(3) 表面流、鉛直浸透量、飽和・不飽和浸透流を考慮した流出計算手法

上記で示した高棹タイプおよびHortonタイプの表面流の発生を同時に考慮し、流出計算を行うためには上記条件を整理し、(16)式の条件のもと4元連立常微分方程式(15)式を解けばよい。

$$\begin{cases} (h > D) & q_* = q_0 = q_s \big|_{h=D} \\ (0 \leq h \leq D) & r(t) < k_s \quad q_0 = r(t) \\ & q_r = q_s + q_* \end{cases} \quad (16)$$

このように土壌・地形特性を決定し、4元連立常微分方程式を解くことにより2つのタイプの表面流、鉛直浸透流および飽和・不飽和側方流の表現が可能である。

(4) 表面流の発生特性

上記で提案した手法を用い数値計算を行うことにより表面流の発生特性について述べる。

土壌・地形特性としては、表層土層厚 $D=20$ cm, 勾配 $i=15^\circ$, 飽和透水係数 $k_s=0.0035$ cm/s, 有効空隙率 $w=0.42$, 透水性を表す $\gamma=5$, 初期流出高 $q_w=0.1$ mm/h, 斜面表面粗度係数 $r=0.6$ とした。与える降雨形態としては、強降雨を想定し降雨強度50mm/h, 降雨継続時間5時間として計算した。まず、降雨強度一定を考え、(15)式を(16)式の条件のもと各斜面長($L=10, 30, 50$ m)で求めた結果を図-1に、各斜面勾配($i=5, 10, 15^\circ$)で求めた結果を図-2に、各飽和透水係数($k_s=0.0015, 0.0025, 0.0035$ cm/s)で求めた結果を図-3に示す。図-1より、斜面長10mのときには表面流が発生せず、斜面長30, 50mのとき高棹タイプの表面流が発生していることがわかる。これは、斜面長が長いほど斜面末端にて土壌中が飽和に達しやすく、水深が表層土層厚を超えやすいためと考えられる。図-2, 3より、斜面勾配 $10, 15^\circ$ のとき、飽和透水係数0.0025, 0.0015cm/sのとき高棹タイプの表面流が発生していることがわかる。これは、斜面勾配が緩やかなほど、飽和透水係数が小さいほど雨水が流下しづらくなり、土壌中が飽和に達しやすくなるためと考えられる。以上により、斜面長が長いほど、斜面勾配、飽和透水係数が小さいほど高棹タイプの表面流は発生しやすいことがわかった。

次に、Hortonタイプの表面流の発生特性を見るため、高棹タイプの表面流が発生しない土壌条件を用い計算を行った。本計算を行うにあたり鉛直浸透式(13)式を用いた。土壌・地形特性としては表層土層厚 $D=30$ cm, 斜面勾配 $i=20^\circ$, 飽和透水係数 $k_s=0.0005$ cm/s, 有効空隙率 $w=0.3$, 湿潤線での毛管負圧 $h_k=30$ cmを基本として計算を行う。各マニングの粗度係数($n=0.1, 0.3, 0.6$)で求めた結果を図-4に、各斜面長($L=10, 30, 50$ m)で求めた結果を図-5に示す。求めた結果より、Hortonタイプの表面流が発生していることがわかり、粗度係数および斜面長の変化は斜面長50m程度では表面流の発生には大きく影響せず、鉛直浸透流の影響が非常に大きいことがわかった。次に土壌・地形特性として、Hortonタイプの表面流の発生した上記計算から飽和透水係数の値を0.001cm/s, 表層土層厚 $D=20$ cmと変化させて求める。これにより、Hortonタイプおよび高棹タイプの表面流を一つの降雨イベントで表現可能である。斜面長を50mとして求めた結果を図-6に示す。

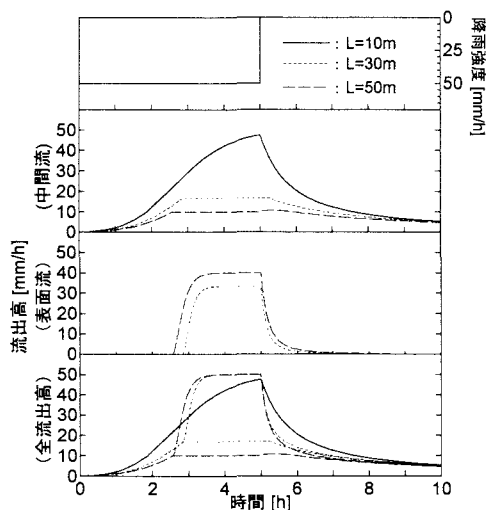


図-1 斜面長を変化させた時の
高棹タイプの表面流の発生特性

鉛直浸透流としては降雨強度が飽和透水係数に達するまで降雨は全て浸透する。図-6 からわかるように、初期に Horton タイプの表面流が発生し、土中が飽和に達した後、高棹タイプの表面流へと変化していることがわかる。これは、Horton タイプの表面流が発生しつつ、鉛直浸透流の影響から表層土壌内が飽和に達し水深が表層土層厚を超えたためである。

以上の結果から、土壌特性の変化に応じて高棹タイプ、Horton タイプと二つの表面流の発生を表現できることを示すとともに、表面流の発生特性を述べた。また、上記の計算は全て常微分方程式より求まり、計算は瞬時に実行可能である。今後河道追跡も考慮し流域全体を解く場合、非常に実用的であることを示している。

以上より規模の大きい出水を対象とする場合も斜面2層構造を考えることにより降雨形態、土壌・地形特性のみから表面流、鉛直浸透流、飽和不飽和側方流を計算可能であることを示した。

4. 本計算手法を用いた降雨流出計算結果 (草木ダム流域を一例として)

上記で提案した斜面多層流出計算手法は表面流の発生を考慮し、非常に大規模な出水を対象としたものであり、土壌・地形特性および降雨形態から表面流の発生を表現可能である。ここでは草木ダム流域への適用を試み、手法の合理性・妥当性を確認する。

(1) 適用流域の概要

適用流域としては、利根川水系の渡良瀬川上流78km地点に位置する多目的ダムである草木ダム流域を対象とする。流域面積は254km²であり、全体的に山地流域といえる。今回用いる降雨データは流域内6地点雨量観測所データにティーセン分割法を用い平均化したものを用い、流量データは草木ダム貯水位から換算したものを用いる。

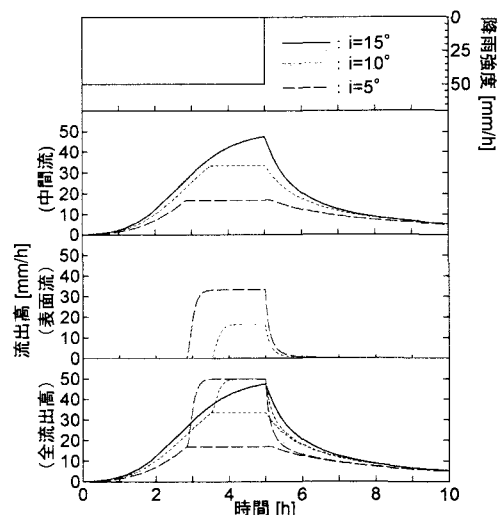


図-2 斜面勾配を変化させた時の
高棹タイプの表面流の発生特性

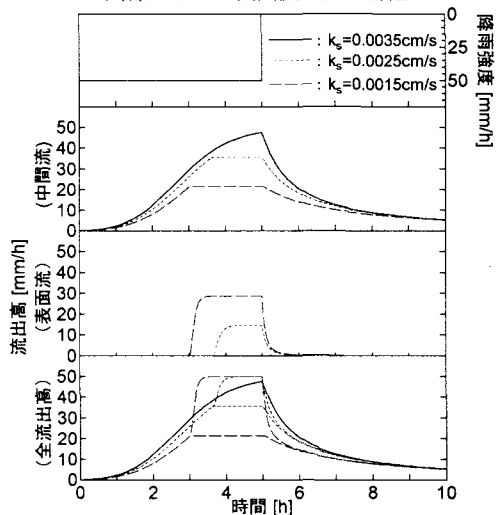


図-3 飽和透水係数を変化させた時の
高棹タイプの表面流の発生特性

(2) 有効降雨の決定

実流域において流出計算を行うには有効降雨の決定を行わなければならない。この点に関して山田ら⁹⁾は保水能の理論から流域における保水能分布を求める手法を提案している。今回の計算では以下に説明する保水能の理論から求めた保水能分布を用い流出寄与域率を求めそれを有効降雨として取り扱う。

累積降雨量がその土壌特性によって決まるある値に達するまで、雨水は直接流出には寄与しない。このときの累積降雨量を保水能 h と定義し、その保水能を持つ土壌の流域全体に占める割合を保水能分布 $S(h)$ と定義する。この定義のもとで、総損失量 $F(R)$ は保水能分布を用いて(17)式のように表現できる。

$$F(R) = R - \int^R (R-h)S(h)dh \quad (17)$$

この(17)式に対してラプラス変換を行い、解を得るとともに総降雨量 $R(t)$ と総損失量 $F(R)$ の関係に(18)式に示す Tanh 関数を用いることにより、保水能分布形状を示す(19)式を求めることが可能である。

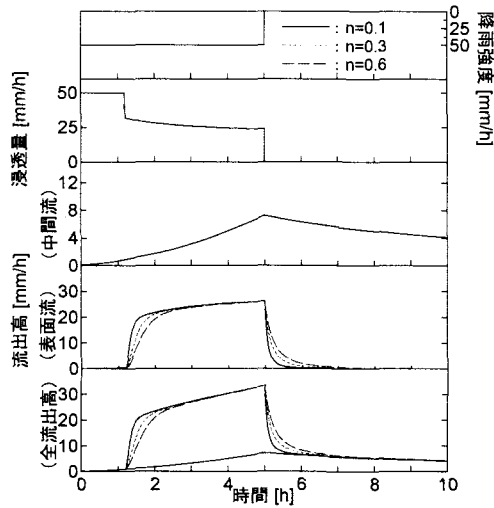


図-4 粗度係数を変化させた時の Horton タイプの表面流の発生特性

$$F(R) = a \tanh(bR) \quad (18)$$

$$S(R) = (1 - ab)\delta(R) + 2ab^2 \frac{\sinh(bR)}{\cosh^3(bR)} \quad (19)$$

ここで、 $\delta(R)$ はディラックのデルタ関数であり、流域の不浸透面積部分の割合を意味する。このときの a, b は実測の総降雨量と損失雨量から回帰を行い決定可能な、流域固有の値である。保水能分布は降雨流出を決定する重要な流域特性であり、この関係より流出寄与域率の時系列が求まる。草木ダム流域における実測の総降雨量-損失雨量の関係を図-7に、求めた保水能分布を図-8に示す。この保水能分布を用いることによりある累積降雨が与えられたとき流域における流出寄与域率を求めることができる。以上より、流出寄与域は以下に示す(20)式および保水能分布より求めることができる。

$$A_e = A \cdot f(t) = A \cdot \int_0^{R(t)} S(h) dh \quad (20)$$

ここに、 A_e :流出寄与域面積、 A :流域面積である。以上より、(20)式より流出寄与域面積が求まり、単一斜面において(15)式を用い求めた流出高に流出寄与域面積を掛けることにより流量を求めることができる。降雨としては実測降雨そのものをとり、流出に寄与する流域が累積降雨量に応じて変動していくという考えである。これは流出寄与域変動モデル(Variable source area model)と同様の考えに基づくものである。

(3) 草木ダム流域における流出計算結果

対象洪水としては草木ダム流域において過去に観測した中規模出水Case1および大規模出水Case2を対象とする。

土壌・地形特性としては、表層土層厚 $D=25\text{cm}$ 、勾配 $i=15^\circ$ 、飽和透水係数 $k_s=0.003\text{cm/s}$ 、有効空隙率 $n=0.42$ 、透水性を表す $\gamma=5$ 、初期流出高 $q_0=0.1\text{mm/h}$ 、斜面表面粗度係数 $n=0.6$ と一般的な値を1例として用いた。著者ら¹⁰⁾は、従来からハイドログラフの逓減特性を用いて土壌・地形特

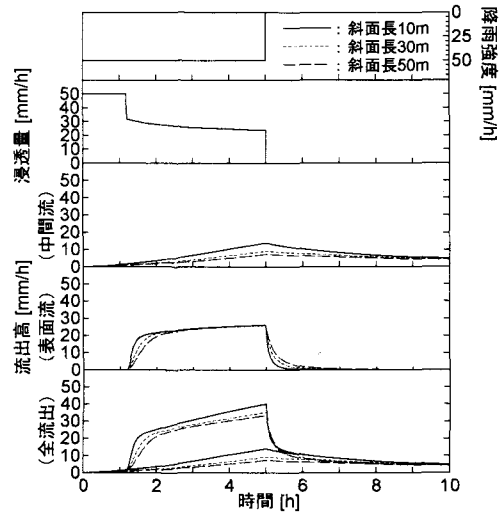


図-5 斜面長を変化させた時の Horton タイプの表面流の発生特性

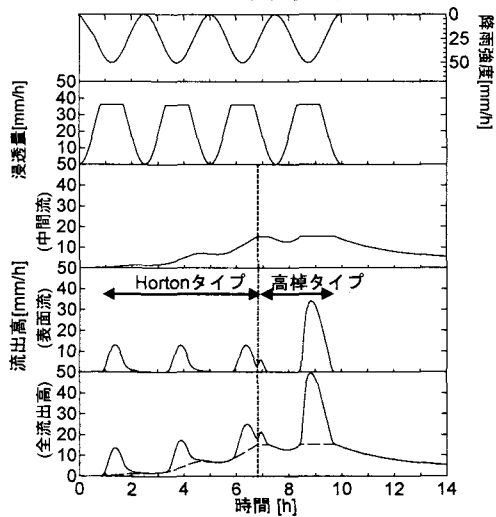


図-6 Horton タイプの表面流から高樺タイプへの変化

性の抽出を試みている。今回用いる土壌・地形特性はハイドログラフの逓減特性から求めた平均流出パラメータとほぼ一致しており、土壌・地形特性に関して合理性は有するものと考えられる。求めた結果を図-9, 10に示す。求めた結果より、今回の土壌・地形特性では中規模出水時(Case1)における直接流出は中間流のみで構成され、大規模出水時(Case2)には高樺タイプの表面流がピーク付近で発生していることがわかる。以上より、本論文で提案する斜面多層降雨流出計算手法は、実際の流域における流出計算においても土壌・地形特性および降雨形態から表面流、鉛直浸透流、中間流を表現可能であることを示した。

5. まとめ

本論文は降雨流出過程における表面流、鉛直浸透流、飽和・不飽和側方流を土壌・地形特性のみから表現可能な斜面多層流れを考慮した降雨流出計算手法を新たに提案したものである。ここで得られた知見を以下に述べる。

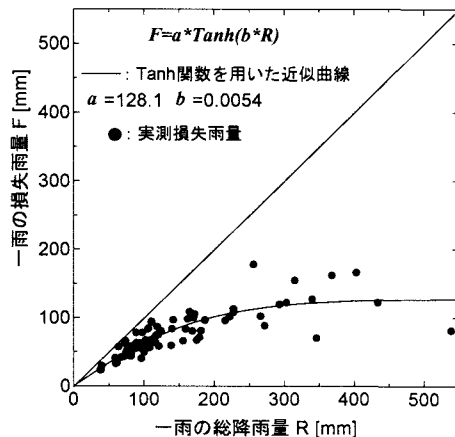


図-7 草木ダム流域における総降雨量と損失雨量の関係

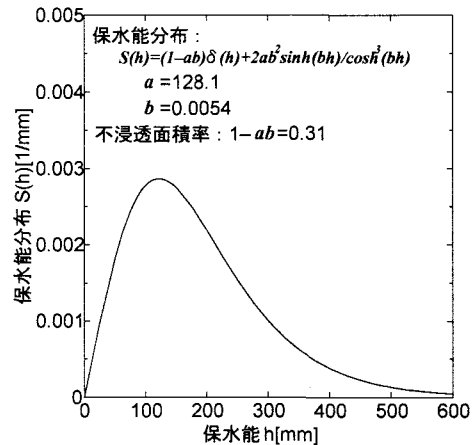


図-8 草木ダム流域における保水能分布

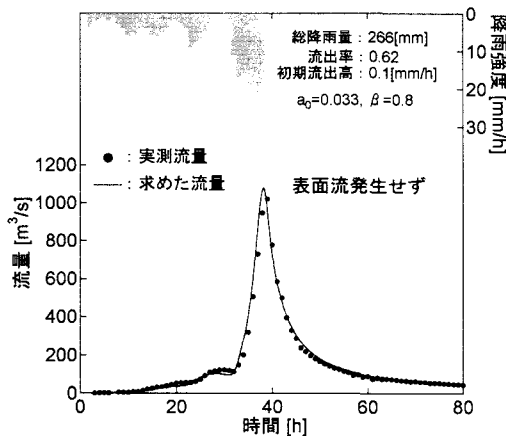


図-9 草木ダム流域における流出計算結果(Case1)

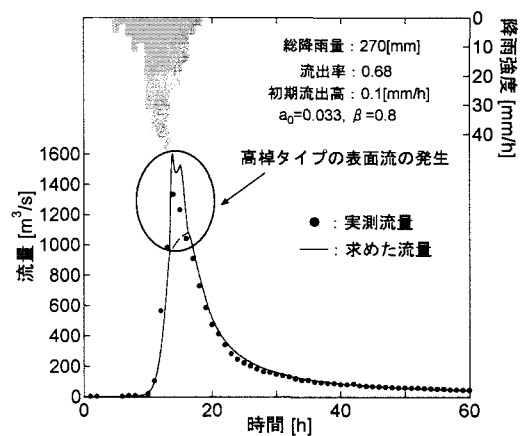


図-10 草木ダム流域における流出計算結果(Case2)

- 1) 表面流、飽和・不飽和浸透流および鉛直浸透流を土壌・地形特性及び降雨形態のみから表現可能な斜面 2 層流れを考慮した降雨流出計算手法を提案した。
- 2) 提案する降雨流出計算手法は表面流の 2 つの発生機構である高樺タイプおよびHortonタイプの表面流を土壌特性のみから表現できることを示した。
- 3) 提案する斜面多層降雨流出計算手法を用いることにより斜面長が長いほど、斜面勾配、飽和透水係数が小さいほど高樺タイプの表面流が発生しやすいことを示した。また、Horton タイプの表面流に関して、マンニングの粗度係数および斜面長の影響は少なく、鉛直浸透流の影響が非常に大きいことを示した。
- 4) 提案する斜面 2 層降雨流出計算手法の草木ダム流域への適用を試みた。求めた結果から土壌・地形特性、降雨形態から表面流の発生・非発生を表現可能であることを示し、提案する降雨流出計算手法の合理性・妥当性を示した。

参考文献

- 1) Horton, R. E. : The role of infiltration in the hydrologic cycle, Trans. Am. Geophys. Union, Vol.12, pp.189-202, 1931.
- 2) Tsukamoto, Y. : An experiment on subsurface flow, J. Jpn. Soc. Forestry, vol.43, 61-68, 1961.
- 3) Hursh, C.R. & Brater, E.F. : Separating storm hydrographs from small drainage area into surface and subsurface flow, Trans. Am. Geophys. Union, 863-870, 1941.
- 4) Betson, R.P. : What is watershed runoff?, J. Geophys. Res., Vol.69, No.8, pp.1541-1552, 1964.
- 5) Hewlett, J.D. : Soil moisture as a source of base flow from steep mountain watersheds, US Dept. Agric., Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, North Carolina, Station Paper No.132, 1961.
- 6) 高樺琢馬 : 出水現象の生起場とその変化過程, 京大防災研究所年報, 第 6 号, pp. 166-180, 1963.
- 7) 吉川秀夫, 砂田憲吾, グエン・ソン・フン : 洪水流量逓減曲線の特性を考慮した流出モデルに関する研究, 土木学会論文報告集, No. 283, 1979.
- 8) 立川康人, 永谷言, 寶馨 : 飽和・不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発, 土木学会水工学論文集, Vol. 48, pp. 7-12, 2004.
- 9) 山田正, 石井文雄, 山崎幸二, 岩谷要 : 小流域における保水能の分布と流出特性の関係について, 土木学会水工学論文集, Vol. 29, pp. 25-26-30, 1985.
- 10) 呉修一, 腰塚雄太, 山田正 : ハイドログラフの逓減特性を用いた流出特性の抽出, 土木学会水工学論文集, Vol. 48, pp. 13-18, 2004.
- 11) 藤田光一, 日野幹雄, 山田正 : ダルシー則に基づく降雨鉛直浸透の解析, 土木学会水工学論文集, Vol. 26, pp. 321-328, 1982.

(2004.9.30 受付)