

降雨流出における斜面と河道の効果に関する研究

A STUDY ON THE EFFECTS OF SLOPE AND RIVER IN RUNOFF

呉修一¹・山田正²

Shuichi KURE and Tadashi YAMADA

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 フェロー会員 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)

The purpose of present study is to clarify the effects of slope and river in runoff. A basin is composed of slope with river channel network and hydrological characteristics such as rainfall, soil property and initial condition of the soil is distributed in a basin. We proposed the runoff analysis method for slope and river which is based on physical mechanism in this paper. The effects of slope and river are compared from the results of runoff analysis. And the effects of spatial distribution of hydrological characteristics are also compared in this paper. In conclusion, the effects of slope and river in runoff are expressed by the travel time ratio of river to slope.

Key Words: runoff, river, slope, spatial distribution

1. はじめに

地表面に到達した雨水がどのような物理法則に基づき、どのような変換作用を受け流域末端まで達するかという問題は従来から精力的に研究されている。降雨流出経路を平面的に考えた場合、流域は河道とそれに沿う斜面とで構成されており、サブ流域として斜面の集合が河道網を通じて連結されていると考えることが出来る。また、流域は土壌特性や降雨等の水文特性が空間的に分布しており、非常に複雑な要素を有している。降雨流出モデルは複雑な流域を平均的に一様空間として扱う集中型流出計算手法と、流域水文特性の空間分布を考慮した分布型流出計算手法に大別される。

平野ら^{1),2)}は斜面流に関して Kinematic Wave 法、特性曲線法に基づく解に、地形特性分布として到達時間の分布を導入した手法を提案し、洪水流出とは様々な到達時間を持ったサブシステムからの流出の総和であることを明らかにした。

山田^{3),4)}は斜面流下方向の浸透流に対して雨水の挙動を支配する方程式を数学的式展開から導出し、解を支配する要因は雨水の斜面末端への到達時間であることを明らかにした。また、流域の持つ水文学的特性は分割された各流域の特性の和と捉え、流域の空間的な分布特性を与える時定数スペクトルの概念を導入し、一般化した流出解析手法を考案している。これにより、流域を一つのブラックボックスとして扱うのではなく、水文学的特性の空間分布を基礎とする流出解析が可能であることが初

めて示された。

藤田^{5),6)}は流域の地形構造と出水特性の関連について支流の分布特性に着目し、流域地形量の定量評価を行うとともに、斜面長の変動を考慮した貯留関数法を提案している。これは、斜面は降雨量を流量に変換する場であり、河道は斜面からの流出量を合成し、運搬する場であるという考えに基づくものである。四俵⁷⁾はある流域からの流出が、その流域内の数多くの独立した流出機構からの流出の和から成ると考え、全体としての流出量逡減部を様々な減衰率を持つ多くの1段タンクの集合として扱い連続的な減衰率スペクトルで表現している。

また、石原ら⁸⁾は流域特性が流出関係におよぼす影響について、河道、斜面における到達時間の概念を用い山間地流域では斜面特性が流路特性よりもいちじるしく大きい影響を与える事を示した。

上述の研究は流域全体を一つのスケールとして扱うのではなく、各小流域の流域全体に占める割合が、流域とそのなかでの雨水の流出過程を説明する特性量として扱われており、流域のもつ水文特性量の空間分布と雨水の運搬過程を結合して議論されている。最近では、立川ら⁹⁾は降雨及び土壌特性の空間分布が降雨流出に与える影響を、分布型流出モデルを用い検証している。これにより、モデルパラメータの分布に関して、降雨の空間分解能よりも狭い範囲におけるパラメータの空間分布は計算流量にほとんど影響を及ぼさず、降雨の変動スケールよりも大きなスケールでモデルパラメータが変化する場合にパラメータの空間分布情報が有効となることを示した。

また、降雨の空間分布に関しては流域面積 200km² 程度のスケールでは計算流量に影響を与えないことを示した。

このように、流域水文特性の空間分布を考慮した降雨流出計算手法が多く提案されると共に、降雨流出における水文特性の空間分布の効果の把握が精力的に行われている。しかしながら、流域水文特性の空間分布が降雨流出に与える影響と流域スケールの関係は未だ定量的に評価出来ていないのが現状である。また降雨流出における河道と斜面の影響や不定流計算の必要性に関するスケールに応じた議論は十分に行われていない。水文特性の空間分布と流域スケールを結びつけるものは河道網であり河道における降雨流出特性の定量的な把握は非常に重要である。

本論文は流域における斜面と河道の降雨流出に与える影響の把握を行い河道追跡計算のスケールに応じた必要性の把握を行う。また、流域水文特性の空間分布が降雨流出に与える影響を斜面長および土壌の初期水分量、降雨の分布に着目しその影響を把握する事を目的とする。

2. 降雨流出の基礎式の導出

著者ら^{10),11),12)}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系方程式を導出している。斜面流下方向流れの断面平均流速を水深の冪乗形式で表現することにより、流出形態の相違を表現する。斜面流の流出経路として中間流、表面流、地下水流れが存在するが、著者ら¹³⁾は土壌特性と降雨強度の関係から高棹タイプの表面流と Horton タイプの表面流を表現可能な斜面多層流れを考慮した降雨流出計算手法の提案も行っている。本論文では降雨流出現象の流域における平面的な影響に対して議論を行うことに主の目的を置いており、斜面流下方向流れに関しては 1 層のみを考慮した計算を行う。以下に斜面及び河道における降雨流出の基礎式の導出に関する理論の概要を示す。

(1) 単一斜面における降雨流出の基礎式の導出

一般化した断面平均流速(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[mm]、 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[mm/h]、 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に短いものとする、相似則として(6)式の変数分離形の近似式が成立する。 $q(x,t) \approx q_*(t)$ (6) ここに q_* : 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。

$$\frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^{\beta} (r(t) - q_*) \quad (7)$$

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

(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。斜面における断面平均流速の式を一般化した(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。

(2) 河道における降雨流出の基礎式の導出

斜面同様に河道においても kinematic wave 法に基づき降雨流出の基礎式が導出される。断面平均流速に関しては(10)式の Manning 則で表現され(11)式の連続式より q_r について整理すると式(12)の Kinematic Wave 方程式が得られる。

$$v_r = \alpha_r h_r^{m_r}, \alpha_r = \frac{\sqrt{i_r}}{n_r} \quad (10), \quad \frac{\partial h_r}{\partial t} + \frac{\partial q_r}{\partial x} = \frac{2q_*(t) \cdot L}{B} \quad (11)$$

$$\frac{\partial q_r}{\partial t} + a_r q_r^{\frac{m_r}{m_r+1}} \frac{\partial q_r}{\partial x} = a_r q_r^{\frac{m_r}{m_r+1}} \frac{2q_*(t) \cdot L}{B} \quad (12)$$

ただし、 $a_r = (m_r+1)\alpha_r^{\frac{1}{m_r+1}}$ 、ここに、 h_r : 水深[m]、 q_r : 単位幅流量[m²/s]、 B : 河道幅[m]、 i_r : 河道勾配、 n_r : Manning の粗度係数であり、Manning 則を用いていることから $m_r=2/3$ となる。ここで斜面同様に河道の流れについても相似則として(13)式の変数分離形の近似式の成立を仮定できる。

$$q_r(x,t) \approx q_{r*}(t) \quad (13)$$

ここに、 $q_{r*}(t)$: 河道における流出高である。河道長 L の末端で考え $x=L$ とすると(12)式は(14)式の流出高に関する常微分方程式に変形できる。

$$\frac{dq_{r*}}{dt} = a_{0r} q_{r*}^{\beta_r} \left(\frac{2q_{s*}(t) \cdot L}{B} - q_{r*} \right) \quad (14)$$

$$\text{ただし, } a_{0r} = a_r L_r^{\beta_r - 1} = (m_r + 1) \alpha_r^{\frac{m_r}{m_r + 1}} L_r^{\frac{-1}{m_r + 1}} \quad (15)$$

$$\beta_r = \frac{m_r}{m_r + 1} \quad (16)$$

(14)式が両側斜面から横流入のある河道における降雨流出を表す基礎式となる。(7),(14)式に示されるよう斜面,河道における降雨流出の基礎式は常微分方程式である。これにより流域全体を対象とする場合においても多元連立常微分方程式として計算を実行可能であり,各地点における流出高が瞬時に求まる。

3. 降雨流出における斜面と河道の効果

降雨流出計算は雨水が地表面に到達してから河川に流出し流域末端に達するまでの追跡計算と考えることが出来る。流域の平面的な構造としては斜面と河道で構成されており,斜面からの横流入量を河道が運搬する役割を果たす。斜面における流れは中間流が卓越し,土壌内が流出経路であるため流速は非常に小さい。これに対して河道部における流れは地表流であり流速としては地中流に比べ非常に大きい。特に上流部の溪流等では河道勾配が大きく流速が非常に大きいため,降雨流出に与える影響は斜面に比べて小さく,ピーク流量の遅れ時間等には影響を与えない。これにより,ある流域スケール以下では河道計算を行う意味はなく流域を複数斜面の集合体と考えることが出来る。しかしながら,どの程度の河道勾配,河道長が計算流量に影響を与えるのか定量的な評価は出来ていないのが現状である。

本論文は,斜面及び河道が降雨流出に与える影響の把握を行うため,河道の両側に長さ一様の矩形斜面を有する単純な流域を想定し流出計算を行う。これにより斜面効果と河道効果の流出現象に与える影響を定量的に把握することを目的とする。

(1) 河道効果が降雨流出に与える影響

単一の河道両側に長さ一様の矩形斜面を想定した仮想的な流域を対象として計算を行う。

単一斜面を想定し降雨を与え,(3)式より求めた斜面下流端における流出高と,その(3)式より求めた流出高を横流入量として(12)式を用い求めた河道下流端における流出高の比較を行う。斜面末端において計算された流出高と河道末端において計算された流出高が一致することとは,降雨流出において斜面の影響が非常に大きく河道の影響は小さいということを意味する。

土壌・地形特性としては斜面に関して表層土層厚 $D=15\text{cm}$, 飽和透水係数 $k_s=0.001\text{cm/s}$, 有効空隙率 $n=0.42$, 斜面勾配 $i=1/9$ とし斜面長を $L=5, 10, 30, 60\text{m}$ を基本として計算を行った。河道に関しては河道勾配 $i_r=1/100$, マニングの粗度係数 $n_r=0.03$ の河道を想定し河道長 $L_r=1, 5, 10\text{km}$

として計算を行った。差分計算条件としては $\Delta x=0.5\text{m}$, $\Delta t=0.5\text{s}$ とし Lax-Wandroff 法を用いた。入力降雨としては全ケースで同一の単峰性降雨(総降雨量: 90mm , ピーク降雨強度: 30mm/h) を Sine 関数で与えた。求めた結果を図-1に示す。求めた結果より,河道長が長く斜面長が短いほど,河道追跡計算を行った場合にピーク流出高が小さくピーク発生時間が遅いことがわかる。しかしながら,全体的に斜面下流端と河道下流端における流出高はほぼ一致していることがわかる。これにより,降雨流出において斜面の影響が大きく河道の影響は小さいといえる。これは,河道における流速が斜面における流速に比して大きいためであり,降雨流出における河道と斜面の効果は流速と流域スケールに依存することがわかる。

(2) 到達時間の概念を用いた河道及び斜面効果の把握

降雨流出における河道と斜面の効果に対して定量的な評価を行うため到達時間の概念を用いる。これは斜面・河道流下方向の流速と流域スケールの関係から河道及び斜面効果の大小が決まるという考えに基づいている。しかしながら,降雨イベント中の河道及び斜面流れの流速は時空間的に変化する。本論文では到達時間を以下の(17)式で示されるよう定義する。

$$T_S = L / v_{\text{peak}} \Big|_{x=L}, \quad T_R = L_r / v_{\text{peak}} \Big|_{x=L_r} \quad (17)$$

ここに, T_S : 斜面における到達時間, T_R : 河道における到達時間, v_{peak} : ピーク流速である。ピーク流速とは下流端において求めた流量から断面平均ピーク流速として計算した。

計算条件として斜面に関しては上記(1)河道効果が降雨流出に与える影響にて用いた土壌・地形特性を用い $5, 10, 30, 60\text{m}$ の斜面長で計算を行った。河道に関しては河道 No.1(河道勾配 $i_r=1/100$, マニングの粗度係数 $n_r=0.03$) および No.2(河道勾配 $i_r=1/1000$, マニングの粗度係数 $n_r=0.05$) の2種類の河道を想定し $1, 5, 10, 50\text{km}$ の河道長で計算を行った。斜面及び河道の到達時間比(T_R/T_S)とピーク流量差率の関係を示したものを図-2に示す。ここでピーク流量差率とは,斜面下流端における流出高から河道下流端におけるピーク流出高を引いて斜面下流端における流出高で除したものと本論文では定義する。また,図-2中のプロットは全て異なる条件で計算されており同一斜面長を有するプロットでも河道長や河道特性が異なる。一つの指標例として図中プロットを斜面長で分類した。

図-2にしめされるよう到達時間比の増大に伴い河道流出計算の効果が増大することがわかる。斜面および河道における到達時間が一致しその比が1となる時,言い代えると斜面・河道における雨水流の速度が一致する時には河道計算を行うことにより流出高の違いが2倍以上生じる。しかしながら,到達時間の比が0.2以下では差がほとんど発生しない。これにより,河道と斜面の到達時間の

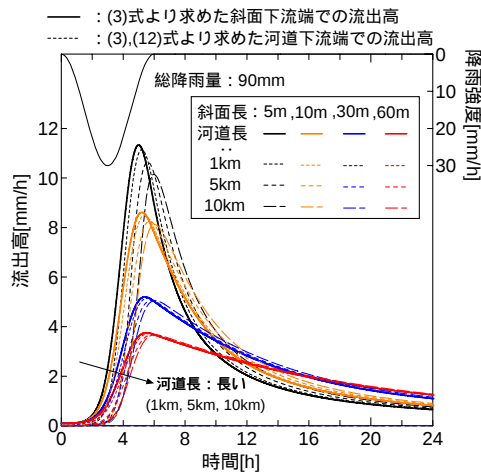


図-1 降雨流出における斜面長及び河道長の効果

影響が1:5程度以下では河道の影響は無視できる事がわかった。つまりは河道部における流れの流速が斜面における流れの流速の5倍程度以上の卓越する流速を有する場合は河道の効果は小さい事がわかる。これにより、斜面効果の卓越する流域においては河道計算の必要性は小さく斜面下流端における流出高を求めれば、流域全体としての流量を算出可能であることがわかった。

(3) 斜面長の空間分布が降雨流出に与える影響

上記までの計算では河道に空間的に一様な矩形斜面を与え計算を行ったが、実地形上では空間的に斜面長が分布している。ここでは、河道に沿って空間的斜面長分布がある場合を想定し斜面長の空間分布が降雨流出に与える影響の把握を目的とし計算を行った。斜面長分布は β 分布形(河道の上・下端の斜面長を0で与える連続した曲線分布)を用い図-3に示すようなCASE1, CASE2, CASE3の分布を用い計算を行った。流域面積一定(0.087km^2)の条件で、それぞれの斜面長分布における河道末端での流出高を求めた。同時に平均斜面長を用い矩形斜面として流出計算も行った。求めた結果を図-4に示す。斜面長分布の偏りの程度が大きいほど流出高が小さく、全てのCASEで平均斜面長を用い求めた流出高よりピークが小さく計算されることがわかる。斜面長が長い場合到達時間が大きくなり、遅れて流出してくる成分が増加するためピーク流出高を下げる結果となる。しかしながら、平均斜面長を2倍程度にして計算を行った場合、斜面長が分布している場合の計算結果とよく一致していることがわかる。これにより、平均斜面長をある程度大きく設定することにより斜面長の空間分布が大きい場合の流出を一様な平均矩形斜面を用いても再現出来ることがわかった。

4. 流域水文特性の空間分布が降雨流出に与える影響

実際の流域を想定した場合、河道網や斜面長分布とい

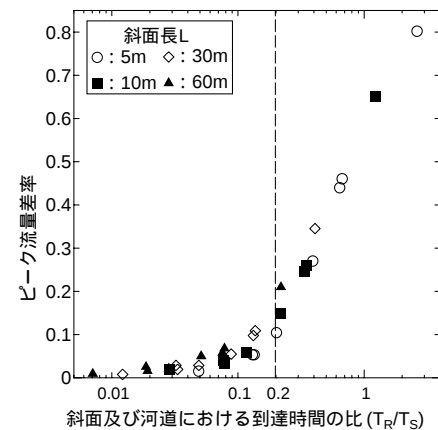


図-2 斜面及び河道における到達時間の比が降雨流出に与える影響

った地形形状の分布以外に土壌や降雨の空間分布が存在する。これら流域水文特性の空間分布が降雨流出に与える影響の把握は未だ不十分である。これは分布型流出計算を行う際に降雨の分解能や土壌の空間分布および河道網の影響等様々な要因が影響するためである。著者らが提案している降雨流出計算手法は集中定数系であり、分布型流出モデルとは異なる。著者らは流域とはサブ流域の集合体であり、各サブ流域に関して空間的に平均の値を用い、それらの総和として流域全体を表現可能と考える。著者らの提案する手法は各サブ流域に対して集中定数方程式を用い流出量を算定し、それらの組み合わせとして流域全体を表現するサブ分布型流出計算手法といえる。

本論文は流域水文特性の空間分布が降雨流出に与える影響を把握するため、仮想的な流域をサブ流域に分割し各サブ流域に対して流出計算を行い、それらを足し合わせる事により流域末端における流量とする。ここでは河道の流出計算は行わない。これは上述したように流域スケールが小さい場合は河道追跡計算の必要性が小さいためである。

計算条件としては面積 100km^2 の仮想流域を想定し、20のサブ流域に分割し各流域に水文特性を分布させた。水文特性に関しては、流域面積、土壌の初期水分状態、降雨、土壌特性を対象とする。空間分布の与え方としては一つの計算で20のサブ流域に対して正規分布に従う乱数として水文特性値を発生させる。次の計算では分散の異なる正規分布を用い水文特性の分布に振れ幅を持たせ計算を行う。乱数で発生させた数値の平均値は正規分布の平均値とは異なる値を示すが、各計算条件で平均値を一定にするため全体からずれた量はサブ流域毎に等分割し足し引きし平均値を保った。土壌特性としては平均的な表層土層厚 $D=20\text{cm}$ 、斜面長 $L=10\text{m}$ 、斜面勾配 $i=20^\circ$ 、飽和透水係数 $k_s=0.0035\text{cm/s}$ 、有効空隙率 $w=0.42$ 、初期流出高 0.1mm/h とした。降雨としては総降雨量 120mm 、ピーク降雨強度 10mm/h の2峰性の降雨をSine関数で与えた。

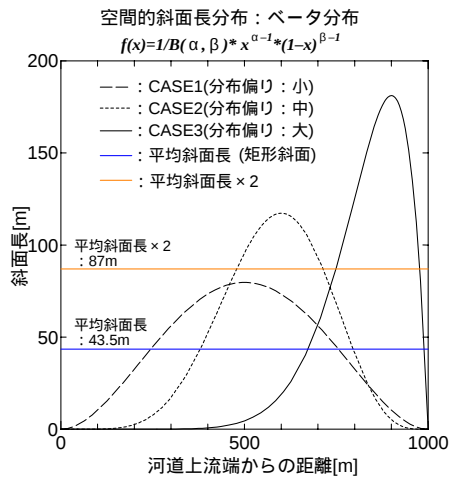


図-3 河道に与えた斜面長分布

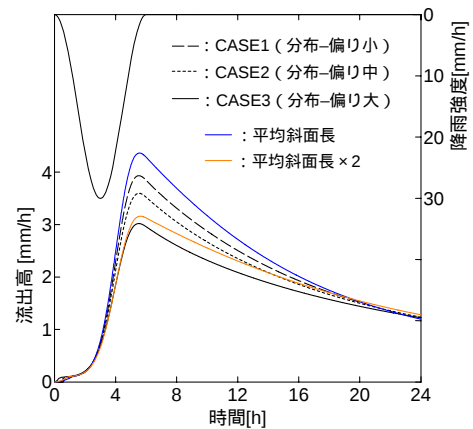


図-4 斜面長の空間分布が降雨流出に与える影響

土壌の初期水分状態の空間分布が降雨流出に与える影響を見るため、初期流出高を平均値 0.3mm/h で 20 のサブ流域に乱数的に発生させた。標準偏差を平均値の 10 ～ 90% と変化させる事で各計算において初期流出高の分布に幅を持たせ計算を行った。求めた結果を図-5 に示す。図-5 に示されるように土壌の初期水分状態の空間分布は平均値が一定の条件下では流量に大きな影響を与えないことがわかった。

次に降雨の空間分布が降雨流出に与える影響を把握するため流域毎にピーク降雨強度を乱数に従い変化させて計算を行った。同様に、標準偏差を平均値の 10 ～ 50 パーセントと変化させ降雨分布に幅を持たせて計算を行った。流域総雨量を一定として計算を行うため、決定した各サブ流域の総降雨量の差分を流域毎に等分割し足し引きした。求めた結果を図-6 に示す。求めた結果より土壌の初期水分状態に比べて流出高の振れ幅が多少大きいことがわかる。初期水分状態は初期値であり土壌が飽和に達した後は流出に影響しないのに対して降雨は降雨イベント中常に流出に寄与するためと考えられる。

次に土壌特性の空間分布が降雨流出に与える影響を把握するため土壌特性を分布させた。土壌特性としては土層厚や斜面長等多くの要因があるため、流出パラメータ a_0 を分布させる事により同様の考えとした。 a_0 の値としては 0.044 を平均値とする正規分布に従い乱数的に発生させた。また、正規分布の標準偏差を平均値の 10 ～ 50% と変化させて分布に幅を持たせた。この a_0 の値は斜面土壌特性として表層土層厚 $D=15\text{cm}$ 、飽和透水係数 $k_s=0.0035\text{cm/s}$ 、有効空隙率 $w=0.4$ 、斜面勾配 $i=20^\circ$ 、斜面長 $L=5\text{m}$ として(4)、(5)、(8)式より求めた $a_0=0.044$ の値を平均値としている。 a_0 の分布としては、上記の条件では最大で 0.022 ～ 0.066 の値をとる。この分布は土壌特性値として、例えば、飽和透水係数を 0.00035 ～ 0.035cm/s に変化させ他の特性値を一定とした時 $a_0=0.022 \sim 0.066$ となる。実際の流域においては飽和透水係数以外にも土壌特性は分布しており、一つの特性値で議論する事が実用

的では無いと考え流出パラメータ a_0 を分布させた。この飽和透水係数の分布を代表例にとっても、かなりの分布を本計算でもたせた事を意味する。求めた結果を図-7 に示す。土壌特性の分布が最も計算流量に影響を与えている事がわかる。また、上記の斜面長の空間分布が降雨流出に与える影響でも述べたように、土壌・地形特性の空間分布のばらつきが大きいほどピーク流量は小さくなっている。

最後に降雨、土壌の初期水分状態及び土壌特性を同時に分布させて求めた結果を図-8 に示す。求めた結果より降雨、土壌の初期水分状態及び土壌特性全てを分布させた場合に最も流出に影響する事がわかる。

全ての計算において流出高の変化は大きくなく河道計算を行う必要のない流域スケールにおいては流域水量の平均値さえ特定する事が出来れば空間的に様な値を用いる事が出来ることがわかった。また、ここで行った計算は水文特性の分布を考慮して計算を行っているが常微分方程式を用いており、計算は瞬時に実行が可能である。これにより、リアルタイムでの分布型流出計算が可能であることも示した。

5. まとめ

本論文は斜面および河道に関する降雨流出計算手法を提案するとともに降雨流出における河道と斜面の効果および水文特性の空間分布の影響を把握する事を目的とした。ここで得られた知見を以下に述べる。

- 1) 斜面流下方向流れと河道部における流れを 2 元連立常微分方程式として求める集中定数系の降雨流出計算手法を提案した。流出パラメータは土壌・地形特性に基づき決定され、連立常微分方程式として計算を行うため瞬時に答えが求まる。
- 2) 河道の効果は斜面長が短く河道長が長いほど大きくなることがわかった。これは斜面長の減少および河道長の増加に伴い、両者の到達時間の比が大きくなり、河

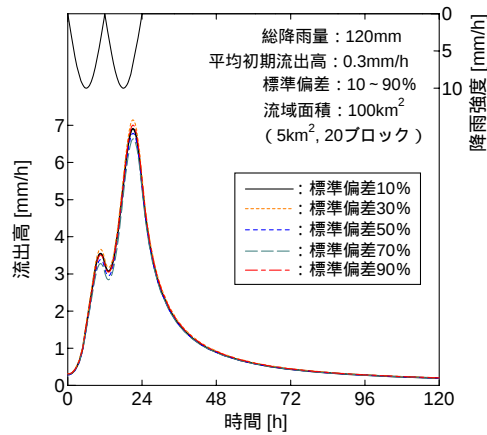


図-5 土壌の初期水分状態の空間分布が降雨流出に与える影響

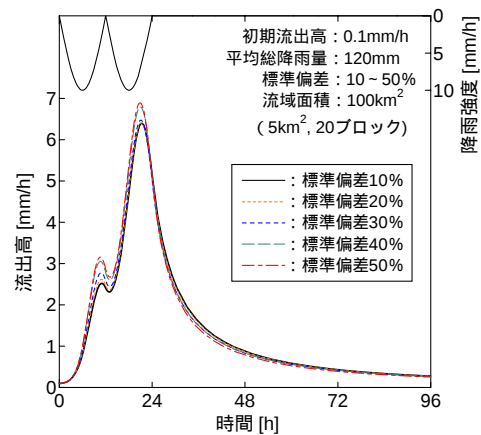


図-6 降雨の空間分布が降雨流出に与える影響

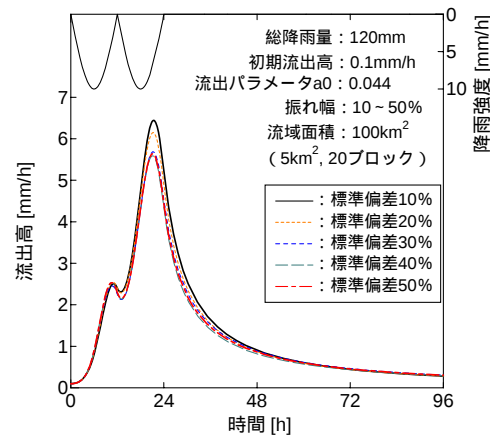


図-7 土壌特性の空間分布が降雨流出に与える影響

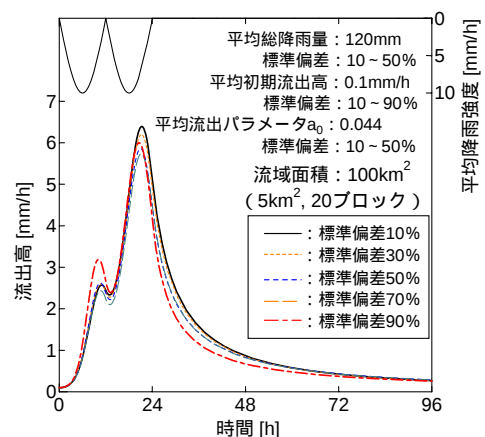


図-8 土壌特性及び降雨の空間分布が降雨流出に与える影響

道の効果が大きくなるためである。

- 3) 河道の効果が降雨流出に影響を与えるのは斜面と河道の到達時間の比が1対5以下であり、河道部の流れの流速が斜面における流れの流速を無視できるほど早いときに河道効果は小さく降雨流出に与える影響は小さいことがわかった。
- 4) 空間的に斜面長が分布している場合と矩形斜面として平均斜面長を用いて計算を行った場合、空間的に分布している時のほうがピーク流出高は小さいことがわかった。これは斜面長が長い場合到達時間が大きくなり、遅れて流出する成分が増加するためである。
- 5) 流域水文特性の空間分布は河道の効果が無いような流域スケールでは降雨流出に与える影響は小さいことがわかった。また水文特性の空間分布として最も流出に寄与するのは土壌特性である事がわかった。土壌特性の空間分布が大きいほどピーク流出高は小さくなる事がわかった。

参考文献

- 1) 平野宗夫, 小川滋, 木川良二: 山腹斜面からの流出について, 第29回土木学会年次学術講演会講演概要集 pp.136-137, 1974.
- 2) 平野宗夫・伊藤尚規: 到達時間の分布を考慮した流出解析, 第22回水理講演会論文集, pp.197-202, 1978.
- 3) 山田正: 山地小流域の瞬間単位図と斜面長分布の関係, 土木

学会論文報告集, 第306号, pp.11-21, 1981.

- 4) 山田正: 時定数スペクトルを用いた山地小流域の洪水流出解析, 土木学会論文報告集, 第314号, pp.87-98, 1981.
- 5) 藤田睦博: 河道網における支流の分布特性に関する研究, 土木学会論文報告集, No.246, pp.35-45, 1976.
- 6) 藤田睦博: 斜面長の変動を考慮した貯留関数法に関する研究, 土木学会論文報告集, No.314, pp.75-86, 1976.
- 7) 四俣正俊: 洪水流量逓減曲線の解釈, 土木学会論文報告集, No.245, 1976.
- 8) 石原藤次郎, 高埴琢馬: 単位図法とその適用に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.60, 別冊(3-3), 1959.
- 9) 立川康人, 永谷言, 實馨: 分布型洪水流出モデルにおける空間分布入力情報の有効性の評価, 京都大学防災研究所年報, 第46号, B-2, 2003.
- 10) 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.
- 11) 山田正: 山地流出の非線形性に関する研究, 土木学会水工学論文集, Vol. 47, pp.259-264, 2003.
- 12) 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.
- 13) 呉修一, 山田正, 吉川秀夫: 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, 土木学会水工学論文集, Vol. 49, pp.169-174, 2005.

(2005.9.30 受付)