

# 降雨流出における流域スケールに応じた 斜面と河道の効果に関する研究

A STUDY ON THE EFFECTS OF SLOPE AND RIVER ON RUNOFF  
ACCORDING TO THE CATCHMENT SIZE

呉修一<sup>1</sup>・下坂将史<sup>1</sup>・山田正<sup>2</sup>

Shuichi KURE, Masashi SHIMOSAKA and Tadashi YAMADA

<sup>1</sup> 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)

<sup>2</sup> 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 on runoff according to the catchment size. A basin is composed of sub-catchments with river channel network. In order to evaluate the effects of river in runoff, runoff calculation is carried out for Tone river basin. The method based on morphological and geophysical properties is applied to runoff calculation in the sub-catchment areas and unsteady flow calculation is carried out for flood routing in river channel network. In conclusion, flood routing calculation in river is not necessary for the small basin with the catchment areas less than 200km<sup>2</sup>.

*Key Words: runoff, river, slope, catchment scale*

## 1. はじめに

流域における降雨流出関係を決定する要因としては、土地利用形態、植生、土壌・地形特性等、様々な要因が存在する。このような水文諸量は空間的にも分布しており、それらは斜面および河道網を媒体として連結されている。流域構造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いると考えることができる。河道網は斜面の集合体としてのサブ流域を連結し、雨水を流域末端へと運搬する役割を果たす。

このような降雨流出関係を表現する手法としては、複雑な流域を平均的な一様空間として扱う集中定数系モデル、流域水文特性の空間分布を考慮した分布定数系モデル、サブ流域に関しては一様空間として扱い、サブ流域の分布を分布定数系モデルとして取り扱うサブ分布定数系モデルの3つに大別することが可能である。これら手法の適用条件として非常に重要な点は、水文特性の空間分布が流域スケールに応じて如何に降雨流出に影響を与えるかを理解する事である。しかしながら、どのような流域スケールまでは水文特性量を一様に平均的に取り扱う事が可能であるかは未だ不明であり、流域スケールに応じて集中定数系モデル、分布定数系モデルの選定が出来ないのが現状である。流域のもつ水文特性量の空間分布と雨水の運搬過程としての斜面、河道を結合して議論する事が非常に重要である。

石原ら<sup>1)</sup>は、河道および斜面における到達時間の概念を用い流域特性が降雨流出関係におよぼす影響について述べている。これにより、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。山田ら<sup>2)</sup>は、実際の流域河道網を対象とし、非線形拡散項を考慮した Kinematic Diffusion の式を提案するとともに Kinematic Wave 法、不定流計算を用い河道部における洪水波の追跡計算を行った。これにより、提案する Kinematic Diffusion の式は河道部における不定流計算に差異のない適用性を示すとともに、拡散効果の影響の大きい下流域においては Kinematic Wave 式に拡散項を考慮した計算が必要であることを示した。また、志村ら<sup>3)</sup>は、サブ流域を対象とした土壌・地形特性に基づく集中定数系流出計算手法と不定流計算を組み合わせることにより、大規模流域を対象としたサブ分布定数系流出計算手法の提案を行なっている。これにより、水理計算に基づき瞬時に大規模流域を対象とした降雨流出計算が行える事を示すとともに、洪水ハイドログラフは本川に対する支川の分布特性によって大まかに決定されることを示した。

立川ら<sup>4)</sup>は、分布型流出モデルを用いるとともに水文特性量の空間分布を様々な条件で与えることにより降雨及び土壌特性の空間分布が降雨流出に与える影響に関して検証を行っている。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 200km<sup>2</sup> 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。呉ら<sup>9)</sup>は、河道部における流れを到達時間の考えを用い降雨流出における斜面および河道の効果の定量的評価を行った。これにより、河道の効果は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 0.2 以上のときであり、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速いときに河道が降雨流出に与える影響は小さいことを示した。また、河道網の影響が無いような流域においては水文特性の空間分布が降雨流出に与える影響は小さい事を示した。

このように流域水文特性の空間分布が降雨流出に与える影響および斜面および河道の影響を把握するための多く研究が行われている。しかしながら、流域特性(流域面積、土壌・地形特性、土地利用形態等)に応じた流出計算手法の選定は未だ不可能なのが現状であるとともに、河道の効果の流域スケールに応じた定量的把握は出来ない。

本論文は、流域における斜面・河道が降雨流出に与える影響の把握を目的とし、仮想流域および利根川流域を対象とし降雨流出計算および洪水波の河道追跡計算を行うことにより、流域スケールに応じた河道追跡計算の必要性の把握を行うものである。

## 2. 降雨流出の基礎式の導出

斜面流下方向流れを対象とした降雨流出計算手法としては、高棹<sup>6)</sup>の表面流・中間流モデルのようにKinematic Wave法に基づき斜面流下方向流れを取り扱いつつ斜面多層流れを考慮する試みがなされている。

山田ら<sup>7),8)</sup>、呉ら<sup>9),11)</sup>は従来から斜面における流下方向流れをKinematic Waveとして取り扱い、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(1)式に示すよう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している。

$$v = \alpha h^m, q = vh = \alpha h^{m+1} \quad (1)$$

ここに、 $v$ : 断面平均流速[mm/h]、 $h$ : 水深[mm]、 $q(t)$ : 単位幅流量[mm<sup>2</sup>/h]、 $m$ : 流出パラメータ(抵抗則)、 $\alpha$ : 流出特性を表すパラメータである。(1)式を用い算出した水深と流出高の関係を図-1に示す。ここで単位幅流量を斜面長 10m で除することにより流出高を算出している。土壌・地形特性としては、表層土層厚  $D=20$ cm、飽和透水係数  $k_s=0.01$ cm/s、有効空隙率  $w=0.42$ 、斜面勾配  $i=30^\circ$ 、斜面長  $L=10$ m、抵抗則  $m=4$  の値を用いている。図-1に示さ

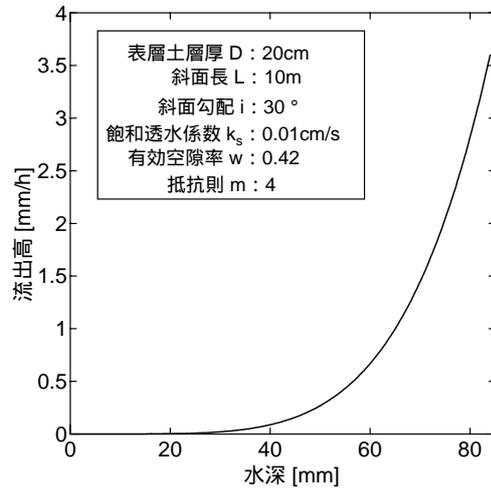


図-1 斜面表層における水深と流出高の関係

れるよう、水深の上昇に伴い流出高が非線形的に上昇していることがわかる。このように、断面平均流速を水深のべき乗形式で表現し、抵抗則  $m$  の値を合理的に決定することで斜面における降雨流出関係が表現可能である。

立川ら<sup>10)</sup>は水深と流量の関係に対して土壌水分量を考慮した流量流積関係式を提案している。これは、高棹の手法に飽和・不飽和流れの機構を導入したものと解釈される。斜面表層水深の増加に伴い不飽和帯、飽和帯、表面流を区分的に表現することにより、斜面流下方向流れを対象としつつ斜面多層構造を物理的背景に基づき取り扱っている。

以下に山田ら<sup>7),8)</sup>、呉ら<sup>9),11)</sup>の降雨流出の基礎式の導出に関する理論の概要を記す。

### (1) 単一斜面における降雨流出の基礎式の導出

山田ら<sup>7),8)</sup>、呉ら<sup>9)</sup>は一般化した断面平均流速(1)式を連続式(2)式に代入し(3)式に示すよう単位幅流量  $q$  について整理するとともに集中化を行うことにより、(4)式に示す集中定数系方程式を得ている。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \quad (2), \quad \frac{\partial q}{\partial t} + a q^{\frac{m}{m+1}} \frac{\partial q}{\partial x} = a q^{\frac{m}{m+1}} r(t) \quad (3)$$

$$\frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (r(t) - q_*) \quad (4)$$

$$\text{ただし, } a = (m+1)\alpha^{\frac{1}{m+1}} \quad (5), \quad a_0 = (m+1)\alpha^{\frac{1}{m+1}} L^{\frac{-1}{m+1}} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{m}{m+1} \quad (7)$$

ここに、 $r(t)$ : 有効降雨強度[mm/h]、 $q_*$ : 流出高[mm/h]である。(4)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。

### (2) 表面流の発生を考慮した降雨流出計算手法

表-1 流出計算にて用いた地形・降雨特性一覧

斜面長:L	5m, 10m, 30m, 60m		
河道長:L <sub>r</sub>	1km, 5km, 10km, 20km		
河道勾配:i	1/100	1/100, 1/1000	
Manningの粗度係数	0.03	0.05	

降雨パターン	Case1	Case2	Case3	Case4
ピーク降雨強度	30mm/h	15mm/h	15mm/h	30mm/h
総降雨量	90mm	90mm	180mm	180mm
降雨形態	単峰性	単峰性	単峰性	2峰性

呉ら<sup>1)</sup>は、土壌・地形特性と降雨強度の関係から表面流、表面流から表層土中への鉛直浸透流、飽和・不飽和側方流に関する多層流れを表現した、降雨流出計算手法を提案している。上記した斜面流下方向流れを鉛直方向一層として取り扱う集中定数系方程式に関して、断面平均流速式における抵抗則 $m$ を異なる値で表現することにより、表面流や中間流等の流れの形態を表現する。

(10)式に示す表面流、中間流、表面流から表層土中への鉛直浸透流および湛水深に関する4元連立常微分方程式を(11)式の条件のもと解くことにより、土壌・地形特性と降雨強度の関係から表面流の発生を表現可能な降雨流出計算が行える。

$$\begin{cases} \frac{dq_s}{dt} = a_s q_s^\beta (r(t) - q_0 - q_s) & \dots \dots \dots \text{表面流} \\ \frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (q_0 - q_*) & \dots \dots \dots \text{中間流} \\ \frac{dq_0}{dt} = (r(t) - q_0) \frac{q_0 - k_s}{h_s + h_k} - \frac{q_0}{(\theta_s - \theta_l) k_s (h_s + h_k)} & (10) \\ \dots \dots \text{表面流から表層土中への鉛直浸透流} \\ \frac{dh_s}{dt} = r(t) - q_0 - q_* & \dots \dots \dots \text{湛水深} \end{cases}$$

$$\begin{cases} (h > D): & q_* = q_0 = q_*|_{h=D} \\ (0 \leq h \leq D), r(t) < k_s: & q_0 = r(t) \end{cases} \quad (11)$$

$$q_r = q_s + q_*$$

ここに、 $q_*$ :飽和・不飽和側方流に関する流出高[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、 $h_s$ :湛水深、 $h_k$ :湿潤線での毛管負圧[cm]である。(11)式に示される条件を考慮する事により、中間流水深が表層土層厚を越える場合と飽和透水係数が降雨強度より大きい場合に表面流が発生する。基本式は全て常微分方程式であり数値解は容易に求まる。以上が、山田ら、呉らが従来から提案している斜面流下方向流れを対象とした降雨流出計算手法の概要である。

### 3. 降雨流出における斜面と河道の効果

呉ら<sup>5)</sup>は、降雨流出における斜面および河道における流れをKinematic Wave法に基づく計算を行うとともに(12)式で示される到達時間の考えを用い降雨流出における斜面および河道の効果の定量的評価を行っている。

$$T_S = L / v_{peak} \Big|_{x=L}, \quad T_R = L_r / v_{peak} \Big|_{x=L_r} \quad (12)$$

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求めた断面平均ピーク流速である。しかしながら、Kinematic Wave法では下流部等の河道勾配が緩やかな箇所や下流端水位の影響の大きい箇所では適用性に問題が生じる。

よって本論文では、河道部における流況計算に関して横流入を考慮した不定流計算を行う。これにより斜面および河道が降雨流出に与える影響を定量的に把握することを目的とする。

計算条件としては、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。河道部における洪水波の追跡計算には連続式及び横流入量を考慮した不定流の基本式(サン・ヴナン式)を用いる。連続式および運動量保存式を(13)式と(14)式にそれぞれ示す。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (13)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 g Q |Q|}{AR^{4/3}} = 0 \quad (14)$$

ここに、 $A$ :通水断面積[m<sup>2</sup>]、 $Q$ :流量[m<sup>3</sup>/s]、 $q$ :側方流入流量[m<sup>2</sup>/s]、 $\alpha$ :エネルギー補正係数(1.0)、 $h$ :水位[m]、 $g$ :重力加速度、 $n$ :Manningの粗度係数、 $R$ :径深[m]である。単一斜面を想定し降雨を与え、Kinematic Wave方程式(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不定流計算を行った場合の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という事は、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 $w=0.42$ 、斜面勾配 $i=1/9$ を基本として計算を行った。その他計算条件としては表-1に示すよう、斜面長を $L=5, 10, 30, 60\text{m}$ 、河道に関しては河道勾配 $i=1/100, 1/1000$ 、マンニングの粗度係数 $n=0.03, 0.05$ の河道を想定し河道長 $L_r=1, 5, 10, 20\text{km}$ として計算を行った。降雨としては、Case1(総降雨量:90mm,ピーク降雨強度:30mm/h,単峰性)、Case2(総降雨量:90mm,ピーク降雨強度:15mm/h,単峰性)、Case3(総降雨量:180mm,ピーク降雨強度:30mm/h,単峰性)、Case4(総降雨量:180mm,ピーク降雨強度:30mm/h,2峰性)の4ケースの降雨をSine関数で与えた。

計算結果の一例として、Case1の降雨で求めた結果を図-2( $n=0.03, i=1/100$ )、図-3( $n=0.05, i=1/100$ )、図-4( $n=0.05, i=1/1000$ )に示す。求めた結果より、河道長が

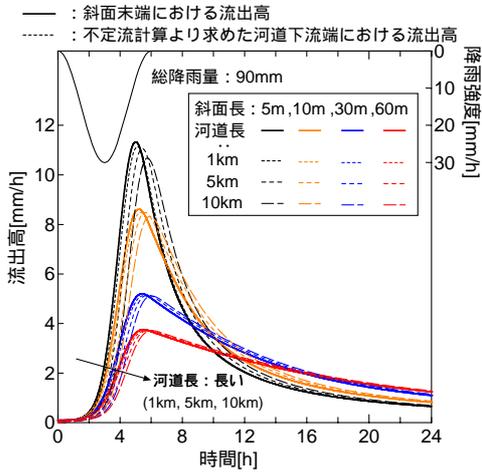


図-2 降雨流出における斜面長及び河道長の効果  
( $n=0.03, i=1/100$ )

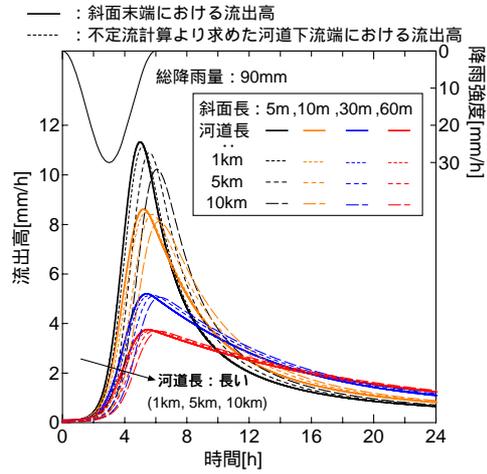


図-3 降雨流出における斜面長及び河道長の効果  
( $n=0.05, i=1/100$ )

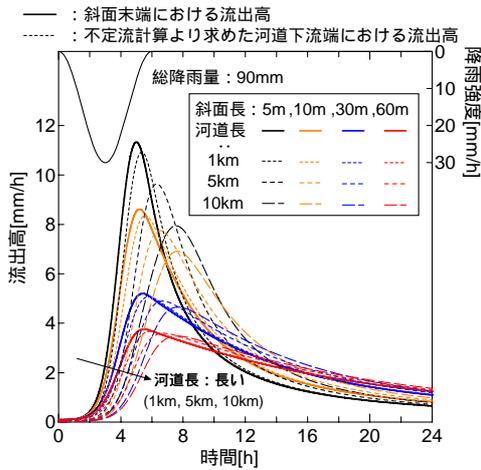


図-4 降雨流出における斜面長及び河道長の効果  
( $n=0.05, i=1/1000$ )

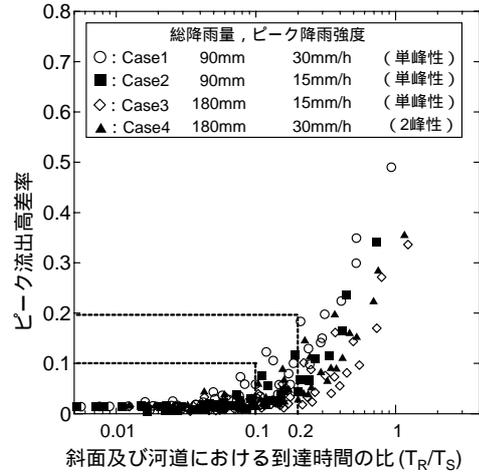


図-5 斜面及び河道における到達時間の比が  
降雨流出に与える影響

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。また、粗度係数が大きいほど、勾配が小さいほど河道の効果が大きくなる事がわかる。このように、河道における流速が斜面における流速に比して大きいとき、河道の効果が小さくなる事がわかる。つまりは斜面および河道の効果は各々の到達時間に影響されることがわかる。

次に、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図-5に示す。ここでピーク流出高差率とは(15)式に示されるよう本論文では定義する。

$$\text{ピーク流出高差率} = \frac{q_* - q_{*r}}{q_*} \quad (15)$$

ここに、 $q_{*r}$ ：河道末端における流出高である。また、図-5中のプロットは全て異なる条件で計算されており同一のプロットでも斜面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降雨ケースで分類した。

図-5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以下ではピーク流出高の差は2割程度であり、0.1以下では1割程度であることがわかる。これは呉ら<sup>5)</sup>がKinematic Wave法に基づく河道計算を行ったときと同様の計算結果であり、Dynamic Wave法、Kinematic Wave法問わず降雨流出における河道の効果は斜面および河道における到達時間の概念を用い評価可能である事を示した。また、降雨形態による差異は大きく見られなかった。

以上により、斜面効果の卓越する流域においては降雨形態によらず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を示した。また、河道効果の小さいような領域においてはDynamic Wave法、Kinematic Wave法の違いは全くない事を示した。

#### 4. 流域スケールに応じた河道の効果

山田ら<sup>7),8)</sup>、呉ら<sup>9),11)</sup>が従来から提案している降雨流出計算手法は単一斜面における河道への横流入量の算定に用いるものであり、流域全体への一元的な適用には限界

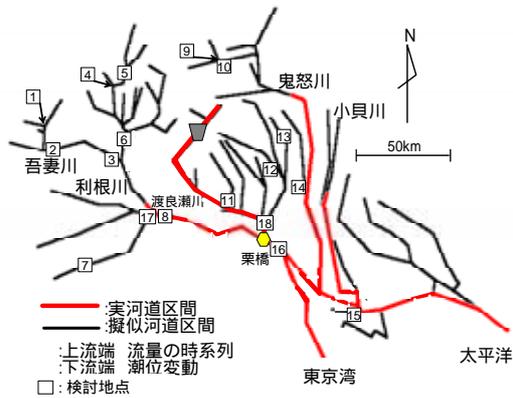


図-6 対象とした利根川河道網と検討地点

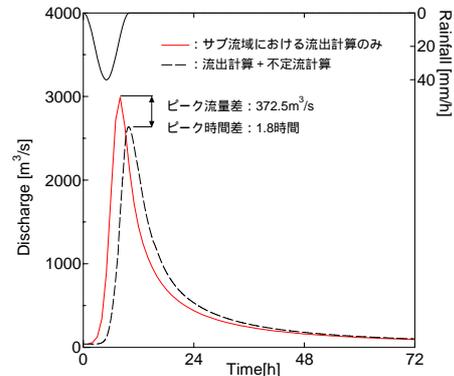


図-7 吾妻川下流地点(流域面積 1391km<sup>2</sup>)における流出計算結果の比較

が存在する。流域はサブ流域とそれらを結合する河道とで構成されており、河道部においては流れの形態が異なる。降雨流出における河道の効果は流域スケールと関係し、流域面積、河道勾配、河道長等の各種条件に基づき河道計算の必要性が決まる。

ここでは、河道部を考慮せずに斜面のみを対象とし集中定数系方程式を流域に一元的に適用した場合と、サブ流域からの流出量を降雨流出計算より算出し、河道部に対して不定流計算を行った場合の流出計算結果の比較を行う。これにより、降雨流出における河道の効果、つまりは不定流計算の流域面積に応じた必要性に関して定量的評価を試みる。

#### (1) 利根川流域を対象とした降雨流出計算

斜面のみを対象とした流出計算とは、(10)式を用い降雨を与え算出した流出高に、検討地点の有する流域面積を乗ずる事により流量として算出したものである。他方、河道計算を考慮した流出計算とは、各サブ流域に対して集中定数系方程式を適用し求めた流量を上流端境界条件や河道部各地点に点として与え、不定流計算を行うものである。一般的に、斜面流出量を河道への横流入量として線的に与え計算を実行するため、河道長の短い河道部においては上流端境界条件として横流入量を与えたが、河道長の長い領域や残流域に対しては河道網の多数中間地点に算定流入量を与えている。対象とした利根川河道網および斜面からの流出量を与えた地点を図-6に示す。

適用流域としては日本最大の流域面積を有する利根川水系全流域(流域面積: 16,840km<sup>2</sup>)に対して流出計算及び不定流計算を行った。土壌・地形特性としては空間的に一様とし、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  $w=0.45$ 、湿潤線での毛管不圧  $h_c=30\text{cm}$ 、初期流出高  $0.1\text{mm/h}$  とした。降雨としては Case1 (総降雨量 100mm, ピーク降雨強度 20mm/h)、Case2 (総降雨量 200mm, ピーク降雨強度 20mm/h)、Case3 (総降雨量 200mm, ピーク降雨強度 40mm/h) の3ケースの単峰性降雨を Sine 関数で空間的に一様に与えた。

利根川河道網として国土交通省関東地方整備局の管内図に掲載されている河川(52河川)を対象とし、1/40万の地形図上で河川と認識できる最上流地点から河口地点

までを対象とする。横断河床形状に関しては、横断形状の実測値が存在する河道部には実測横断河床形状を、実測値が無い河道部には擬似横断河床形状を用いた。擬似横断河床形状とは地形図から読み取った堤防幅と低水路幅をもとに決定した複断面形状のことである。実測横断河床形状、擬似横断河床形状を適用した河道はそれぞれ実河道区間、擬似河道区間として図-6に示している。河床の粗度係数は、渡良瀬川に関しては2001年と2002年の洪水の痕跡調査からセグメントごとに算出した値を、渡良瀬川以外の河道には上流部、中流部、下流部の3種類に分け、それぞれに0.03, 0.025, 0.02を基準粗度係数として与えた。これら基準粗度係数に0.005を増減させ、3ケースの粗度係数を設定し計算を行った。下流端境界条件としては、下流端にあたる江戸川河口と利根川河口のそれぞれに芝浦、鹿島で実測された潮位の時系列を与えた。

#### (2) 降雨流出における流域スケールに応じた河道の効果

集中定数系方程式のみを用いた流出計算結果と不定流計算を行った流出計算結果の比較を18検討地点(図-6)で行った。計算結果の一例として、吾妻川下流地点(地点, 流域面積 1391km<sup>2</sup>)にて2つの手法から求めた流量ハイドログラフを図-7に示す。求めた結果より、河道部における洪水追跡として不定流計算を行い算出した流量は、ピークが遅く小さく算出されていることがわかる。

次に検討地点18箇所において求めたピーク流量差率、ピークの遅れ時間の関係を図-8,9に示す。ピーク流量差率とは、(16)式に示されるよう本論文では定義する。

$$\text{ピーク流量差率} = \frac{Q_{\text{流}} - Q_{\text{不}}}{Q_{\text{流}}} * 100 \quad (16)$$

ここに、 $Q_{\text{流}}$ : 流出計算のみを行い算出したピーク流量、 $Q_{\text{不}}$ : 不定流計算も行い算出したピーク流量である。3ケースの基準粗度係数および3ケースの降雨で求めた値を同時に示している。求めた結果より、粗度係数の増大に伴い、ピーク流量差率および遅れ時間は増加していることがわかる。図-8に示されるよう、ピーク流量差率は流域面積 200km<sup>2</sup> 以内ではほとんど生じないが、流域面積が

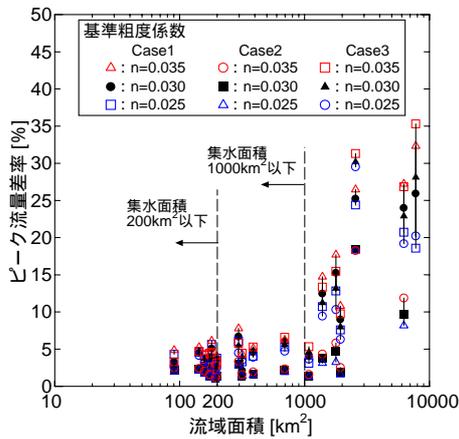


図-8 流域面積とピーク流量差率の関係

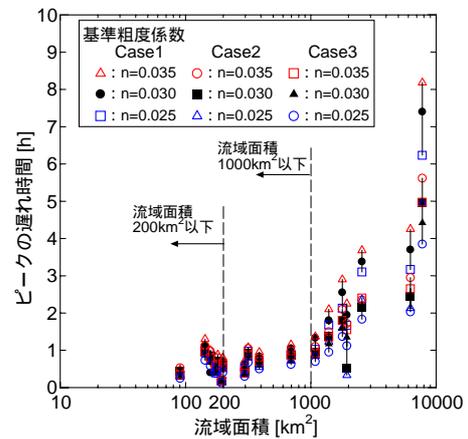


図-9 流域面積とピークの遅れ時間の関係

1000km<sup>2</sup>以上を超えると急激に大きくなることわかる。図-9に示されるピークの遅れ時間に関しても同様のことが言える。これにより、流域面積の大小関係から不定流計算の必要性が定量的に評価可能であり、流域面積200km<sup>2</sup>を境界として不定流計算の必要性が生じることがわかった。また、同程度の流域面積においても粗度係数の影響や遅れ時間等が異なる場合がある。これは、利根川全流域を対象として計算を行っており各サブ流域において河道勾配や支川の分布特性が異なるためである。

以上により、集中定数系方程式のみを用い流域を一元的にとらえ流出計算を行うには流域面積200km<sup>2</sup>程度までということを示した。200km<sup>2</sup>を超える流域面積を有する流域においては河道効果の影響が大きくなり、不定流計算の必要が生じる。しかしながら、日本国内において流域面積が200km<sup>2</sup>以内のダム流域程度に対しては集中定数系方程式の一元的な適用が可能となり河道計算は不要ということが示された。

## 5. まとめ

本論文は降雨流出における河道と斜面の影響を流域スケールに応じて定量的に把握する事を目的とし、仮想的な流域と利根川全流域を対象として降雨流出計算を行ったものである。ここで得られた知見を以下に述べる。

- 1) 不定流計算を用いた河道追跡計算において、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を示した。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、河道の効果が大きくなるためである。
- 2) 不定流計算を用いた河道追跡計算において、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を示した。

- 3) 利根川全流域を対象とした降雨流出計算および不定流計算を行うことにより、流域面積が200km<sup>2</sup>以下の流域においてはピーク流量差率、ピークの遅れ時間ともに小さく河道計算の必要性が少ないことを示した。

謝辞：本研究の一部は平成17年度文部科学省科学研究費補助金基盤研究(B)(代表：山田正 課題番号：17360238)及び平成15年、18年度中央大学共同研究プロジェクト(代表：山田正)の助成を受け実施された。ここに感謝の意を記す。

## 参考文献

- 1) 石原藤次郎, 高棹琢馬: 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.
- 2) 山田正, 豊田康嗣: 洪水におけるハイドログラフの特性とその形成過程に関する研究, 土木学会水工学論文集, Vol.35, pp.143-148, 1991.
- 3) 志村光一, 大原憲明, 松木浩志, 山田正: 水理計算に基づく大規模河道網の洪水流出特性に関する研究, 水文・水資源学会誌, Vol.14, No.3, pp.217-228, 2001.
- 4) 立川康人, 永谷言, 寶馨: 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.
- 5) 呉修一, 山田正: 降雨流出における斜面と河道の効果に関する研究, 土木学会水工学論文集, Vol.50, pp., 2006.
- 6) 高棹琢馬: 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) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.

(2006.9.30 受付)