

水文特性の空間分布および河道の効果が降雨流出に与える影響

中央大学理工学部	学生員	織田 賢太
中央大学大学院	学生員	富澤 彰仁
中央大学大学院	学生員	呉 修一
中央大学理工学部	フェロー会員	山田 正

1. はじめに

降雨流出機構を明らかにすることは、水資源の確保のみならず洪水災害を予測する上でも非常に重要である。著者は物理的観点に立脚した洪水予測システムの構築を目的とし、従来から山地流域における降雨流出計算手法を提案している。本論文は、土壌や降雨といった水文特性の空間分布が降雨流出に与える影響を明らかにすることを目的とし、水文特性を空間的に分布させた状態で降雨流出計算を行うことにより、算出される流出ハイドログラフの比較検討を行ったものである。

2. 単一斜面における降雨流出の基礎式の導出

著者は従来から単一斜面における降雨流出の基礎式の導出を行っている。以下に著者らの理論の概要を記す。様々な流出形態に対応させるため一般化された断面平均流速を(1)式とし、連続式は(2)式で表す。(1)式を(2)式へ代入し単位幅流量 q について整理することにより、(3)式で示される表面流に関するkinematic wave方程式が得られる。ここに、 v ：断面平均流速mm/h、 h ：湛水深mm、 $q(t)$ ：単位幅流量mm²/h、 $r(t)$ ：有効降雨強度mm/h、 m は流域の流出特性を表すパラメータである。直接流出は流出寄与域(河道及び河道近傍の湿潤領域)のみからの流出と考えると斜面長は実地形上の斜面長より十分短いものと考えられ、(4)式の変数分離形の近似式が仮定できる。ここに、 q_* ：流出高mm/hである。斜面長 L の末端で考え $x=L$ とすると(3)式は(5)式で示される流出高に関する常微分方程式に変形できる。(5)式は斜面流下方向を対象とし、一般化された単一斜面からの降雨流出を表す基礎式となる。

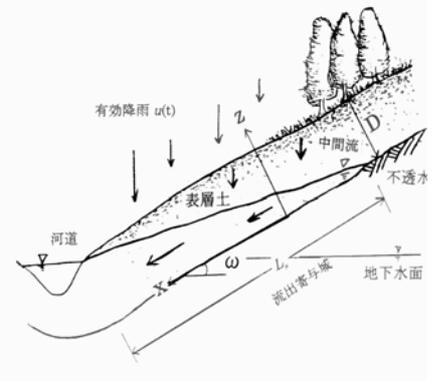


図-1 単一斜面における降雨流出の模式図

$$v = \alpha h^m, \quad q = vh = \alpha h^{m+1} \quad (1), \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \quad (2), \quad \frac{\partial q}{\partial t} + aq^{\frac{m}{m+1}} \frac{\partial q}{\partial x} = aq^{\frac{m}{m+1}} r(t) \quad (3), \quad q(x,t) \cong xq_*(t) \quad (4)$$

$$\frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (r(t) - q_*) \quad (5), \quad a = (m+1)\alpha^{\frac{1}{m+1}}, \quad a_0 = aL^{\beta-1} = (m+1)\alpha^{\frac{1}{m+1}} L^{\frac{-1}{m+1}} \quad (6), \quad \beta = \frac{m}{m+1} \quad (7), \quad \gamma = m+1 \quad (8)$$

(5)式の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相違を表現する。表面流と中間流を連結する鉛直浸透流に関しては、山田が従来から提案している Green-ampt 理論に基づく鉛直浸透流を用いる。表面流に関しては高棹タイプと Horton タイプの表面流の発生機構を考慮する。以上、(9)式に示す表面流、中間流、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(10)式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。

$$\begin{cases} \frac{dq_s}{dt} = a_s q_s^{\beta_s} (r(t) - q_0 - q_s) & \dots \text{表面流} \\ \frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (q_0 - q_*) & \dots \text{中間流} \\ \frac{dq_0}{dt} = (r(t) - q_0) \frac{q_0 - K_s}{h_s + h_k} - \frac{q_0}{(\theta_s - \theta_l) K_s (h_s + h_k)} & \dots \text{鉛直浸透流} \\ \frac{dh_s}{dt} = r(t) - q_0 - q_* & \dots \text{湛水深} \end{cases} \quad (9), \quad \begin{cases} (h > D): & q_* = q_0 = q_s|_{h=D} \\ (0 \leq h \leq D, \quad r(t) < k_s): & q_0 = r(t) \end{cases} \quad (10)$$

$$q_T = q_s + q_*$$

ここに、 D ：表層土層厚， α ：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， i ：斜面勾配， q_s ：表面流に関する流出高mm/h， q_T ：全流出高mm/h， q_0 ：鉛直浸透流， h_s ：湛水深cm， h_k ：湿潤線での毛管不圧cm， t_p ：湛水開始時刻である．湛水開始時刻に関しては土壌特性から決定される．表面流はマンニング則をとり，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．基本式は全て常微分方程式であり解は瞬時に求まる．以上が著者らの理論の概要である．

3. 水文特性の空間分布が降雨流出に与える影響

実際の山地流域の土壌特性を把握するには現地におけるボーリング調査等の実施が必要である．また，ボーリング調査は各調査地点における鉛直方向の土壌特性の分布を知ることは可能であるが，飽和透水係数の水平分布を把握する為には非常に多くのボーリング調査が必要となる．このような土壌特性値の空間的な分布が降雨流出に与える影響の定量的評価は未だ不十分である．本章では仮想的な流域を対象とし，実地形上において空間的に分布している飽和透水係数を考慮して流出計算を行った．

仮想流域は，面積 100km^2 とし，その仮想流域を面積 5km^2 ごとに分割した 20 のサブ流域に対して，水文特性を正規分布に従う乱数を用いて空間的に分布させた．分布させる水文特性値としては飽和透水係数，表層土層厚，有効空隙率を分布させた．計算条件は斜面長 $L=10\text{m}$ ，表層土層厚 $D=20\text{cm}$ ，飽和透水係数 $k_s=0.02\text{cm/s}$ ，有効空隙率 $w=0.42$ ，斜面勾配 $i=15^\circ$ ，抵抗則 $m=4$ ，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．また，河道での水の流れは，斜面での水の流れに対して無視できるほど早いとし河道計算は行わずに各サブ流域で得た流出高を単純に足し合わせる事によって流域全体での流出高を求めている．標準偏差を平均飽和透水係数 0.02cm/s の $\pm 10\%$ ， 50% ， 90% で与え，流出計算を行った．その結果を図-2，図-3 に示す．図-2 は標準偏差 $\pm 50\%$ のときの各サブ流域における流出高ハイドログラフである．各サブ流域においては飽和透水係数の空間分布によって流出高に差異が生じていることがわかる．しかしながら図-3 を見ると流域末端における流出高ハイドログラフは立ち上がり，逡減部ともにほとんど差異は見られず，流域全体ではその流域における代表的な値が分かれば，飽和透水係数の空間分布が流出高に与える影響を無視できることを示している．同様に，有効空隙率，表層土層厚に関しても空間的に分布させ計算を行った．その結果，これらの特性値が降雨流出に与える影響は少なく，土壌特性値の空間分布の影響を無視できることがわかった．以上より，河道効果の無視で

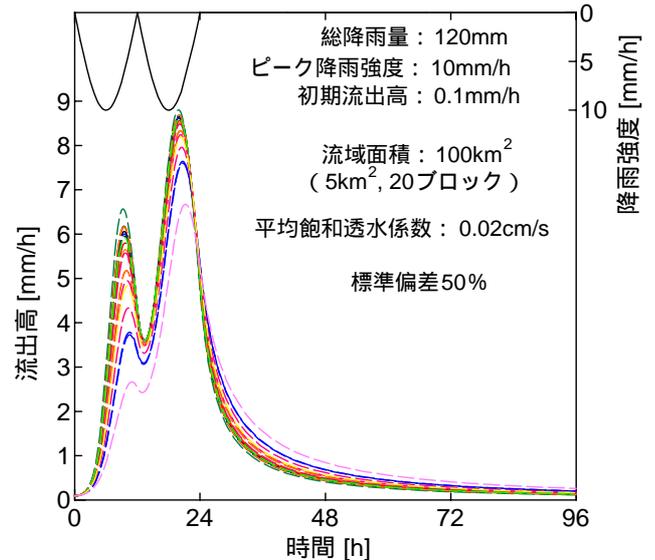


図-2 各サブ流域における流出高

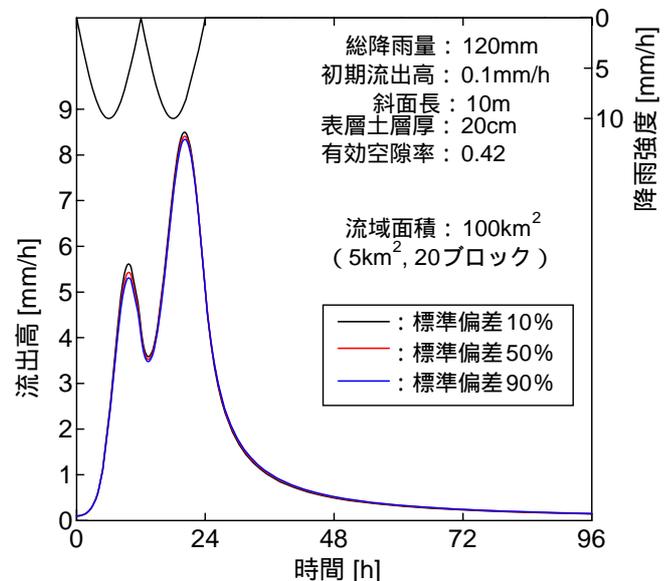


図-3 飽和透水係数の空間分布が降雨流出に与える影響

きるような 100 km²程度の流域スケールでは水文特性の空間分布が降雨流出に与える影響は少なく，水文特性量を平均値として扱えることを示した．

4．草木ダム流域を対象とした降雨流出計算

前章では仮想流域で降雨流出計算を行うことにより，100 km²程度の流域スケールでは水文特性の空間分布が降雨流出に与える影響は少なく，水文特性量を平均値として扱えることを示した．本章では実流域において水文特性の空間分布および河道の効果が降雨流出に与える影響がどの程度かを解明することを目的として降雨流出計算を行った．実流域として，利根川水系渡良瀬川流域上流に位置する草木ダム流域(流域面積 254km²)を対象とし，15 のサブ流域に分割し，飽和透水係数と降雨を分布させた．また，河道効果を考慮し横流入を考慮した一次元不定流計算を行った．サブ流域の土壌地形特性として斜面長 $L=30m$ ，表層土層厚 $D=20cm$ ，有効空隙率 $w=0.42$ ，斜面勾配 $i=15^\circ$ ，抵抗則 $m=4$ ，初期流出高 0.1mm/hを用いた．

4.1 飽和透水係数の空間分布が降雨流出に与える影響

飽和透水係数の空間分布が降雨流出に与える影響を解明するため，飽和透水係数を乱数で空間的に分布させた．実際の流域における水文諸量の空間分布は非対称となり正規分布に従わないことが多く対数正規分布に従うことが多く報告されている．そこで，水文量 x の対数を取り， $\log x$ が正規分布に従うものとした対数正規分布を用い，飽和透水係数を空間的に分布させた．対数正規分布に用いた確率密度関数を(11)式に示す．

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left\{-\frac{(\log x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} & \dots (x > 0) \\ 0 & \dots (x \leq 0) \end{cases} \quad (11)$$

ここで，分布形を決定する μ ，に関しては[平均値 $\mu = -4.41$ ，標準偏差 = 1.0]，[平均値 $\mu = -4.157$ ，標準偏差 = 0.7]を用い，飽和透水係数の平均値が 0.02cm/s となるように計算を行った．降雨は

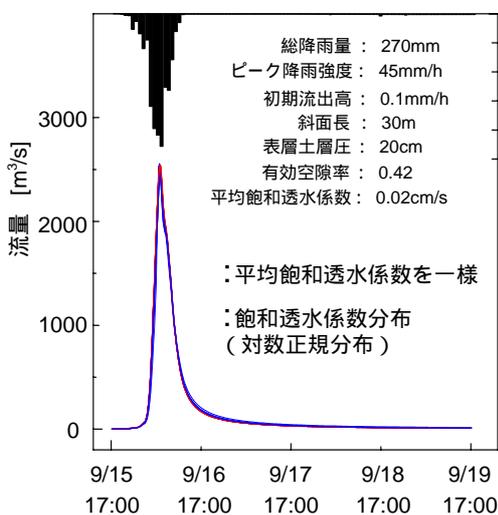


図-4 飽和透水係数の空間分布が降雨流出に与える影響[対数正規分布]

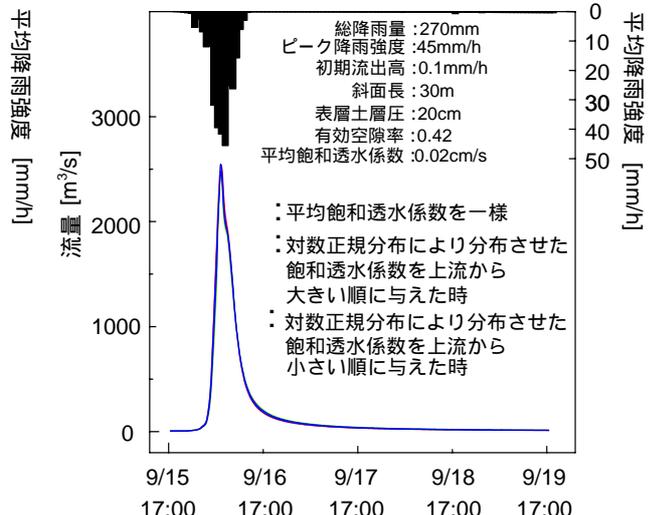


図-5 飽和透水係数の空間分布が降雨流出に与える影響[対数正規分布] (飽和透水係数の大小順に配置)

流域平均降雨を用いた．飽和透水係数を空間的に分布させた場合を図-4，また空間相関の極端な場合を想定し，飽和透水係数の小さい値を斜面上端部から並べた場合と飽和透水係数の大きい値を斜面上端部から並べた場合を図-5 に示す．図を見るとハイドログラフは立ち上がり，減衰部ともにほとんど差異は見られず，いずれの場合も流量の差異は，無視できる程度少ないことがわかる．これにより，飽和透水係数の空間分布が降雨流出に与える影響は小さいことを示した．

4.2 降雨の空間分布が降雨流出に与える影響

降雨の空間分布が降雨流出に与える影響を解明するため、飽和透水係数 $k_s=0.02\text{cm/s}$ を流域一様に与え、降雨としては6地点の雨量観測所で計測された雨量（分布雨量）とテーゼン分割から求めた総降雨量270mm、ピーク降雨強度45mm/hの流域平均雨量を用いた。流域平均雨量を用いた場合と、分布雨量を用いた場合で行った計算結果を図-6に示す。ハイドログラフを見ると立ち上がり、逓減部ともにほとんど差異は見られず、流量の差異は、無視できる程度少ないことがわかる。これにより、降雨の空間分布が降雨流出に与える影響は小さいことを示した。しかしながら、今後はレーダー雨量分布などを用い、分割スケールと降雨の代表スケールの関係などの更なる検証が必要となる。

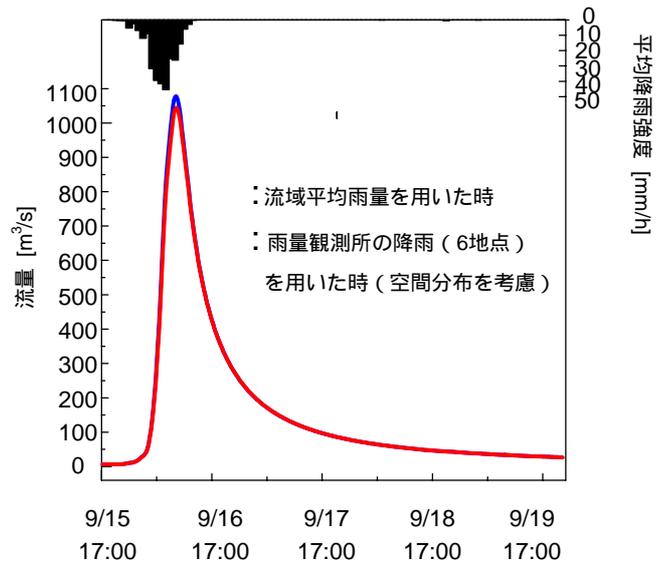


図-6 降雨の空間分布が降雨流出に与える影響

4.3 河道の効果が降雨流出に与える影響

日本におけるダム流域スケールの流域において、河道の効果が降雨流出に与える影響を定量的に評価するため、一次元不定流計算を行い河道効果を考慮した場合と、一次元不定流計算を行わずサブ流域における流出計算結果を単純に重ね合わす事で河道効果を考慮しなかった場合の比較を行う。求めた結果を図-7に示す。ハイドログラフを見ると河道の効果を考慮するか否かで、河道の効果を考慮したほうがピーク流量が少なく、ピーク流量正規時刻が遅れていることがわかる。しかしピーク流量、ピーク流量正規時刻の差異はともに少なく、無視できる程度であることがわかる。これにより、河道の効果による降雨流出に与える影響は小さいことを示した。

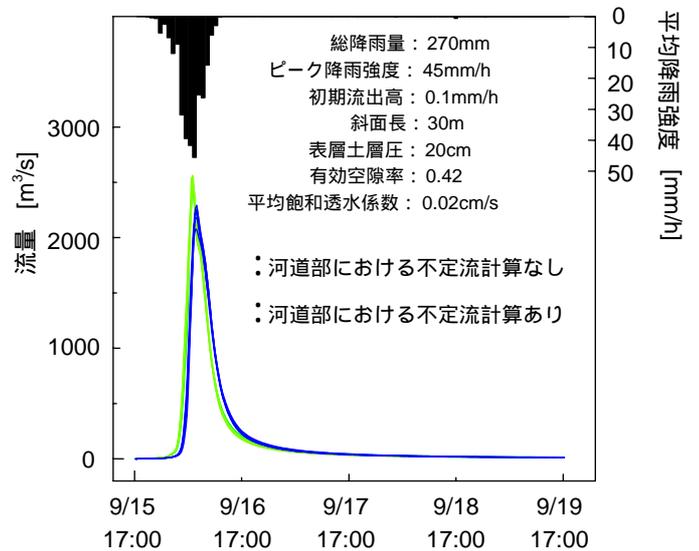


図-7 河道の効果が降雨流出に与える影響

以上により、流域面積250km²程度のダム流域程度では飽和透水係数と降雨の分布及び、河道の効果が降雨流出に与える影響は無視できる程度であり、集中定数系流出モデルの一元的な適用が可能であることが示された。これらは従来から著者らが述べている結果と一致し、実際のダム流域における適用からもこのことが示された。

5. まとめ

ダム流域スケールでは飽和透水係数、降雨の平面的な空間分布及び河道の効果が降雨流出に与える影響は少なく、水文特性値を平均値として扱えることを示した。これらは従来から著者らが述べている結果と一致し、実際のダム流域における適用からもこのことが示された。

参考文献

- 1) 塚本良則：森林水文学，文永堂出版，1992
- 2) 山田正：山地流出の非線形性に関する研究，土木学会水理講演会論文集，Vol. 47, pp. 259-264, 2003.
- 3) 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