

水文特性の空間分布が降雨流出に与える影響

中央大学理工学部	学生員	秋山 誠
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。著者ら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

著者ら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 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。

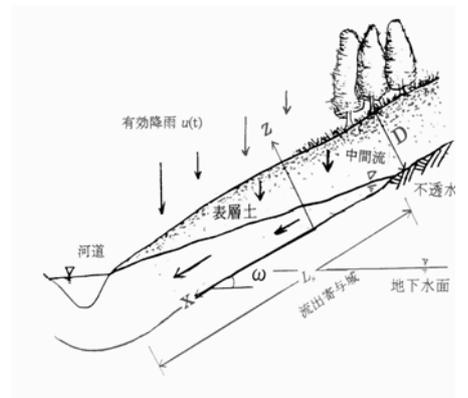


図-1 単一斜面における降雨流出機構の模式図

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

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

(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形態を表現する。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。

$$\begin{cases} \frac{dq_s}{dt} = a_s q_s^{\beta_s} (r(t) - q_0 - q_s) & \dots \text{表面流} \\ \frac{dq_m}{dt} = a_m q_m^\beta (q_0 - q_s) & \dots \text{中間流} \\ \frac{dq_0}{dt} = (r(t) - q_0) \frac{q_0 - K_s}{h_s + h_k} - \frac{q_0}{(\theta_s - \theta_i) K_s} \frac{(q_0 - K_s)^2}{(h_s + h_k)} & \dots \text{鉛直浸透流} \\ \frac{dh_s}{dt} = r(t) - q_0 - q_s & \dots \text{湛水深} \end{cases} \quad (9), \quad \begin{cases} (h > D): & q_* = q_0 = q_s|_{h=D} \\ (0 \leq h \leq D, r(t) < k_s): & q_0 = r(t) \end{cases} \quad (10)$$

$$q_r = q_s + q_m$$

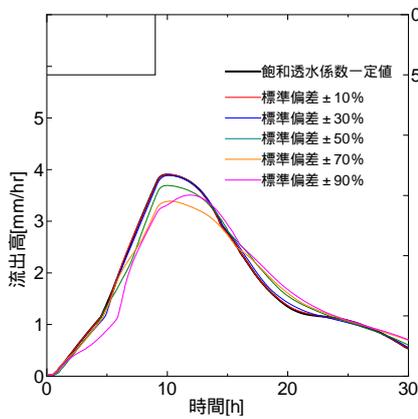


図-2 飽和透水係数の空間分布が降雨流出に与える影響

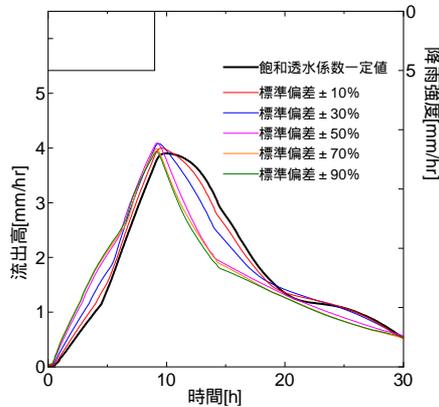


図-3 飽和透水係数の空間分布が降雨流出に与える影響(飽和透水係数の小さい値を斜面上端部から並べた場合)

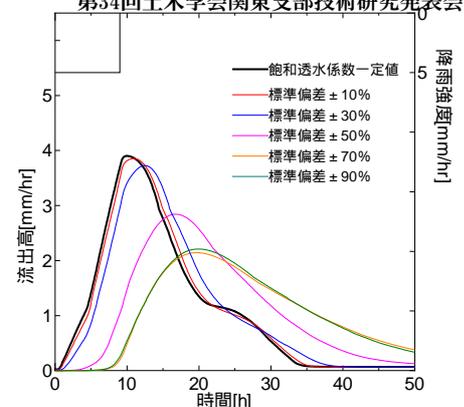


図-4 飽和透水係数の空間分布が降雨流出に与える影響(飽和透水係数の小さい値を斜面下端部から並べた場合)

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 Manning 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. 単一斜面における飽和透水係数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分布を知ることは可能であるが，面的に飽和透水係数の空間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解明は未だ不十分である．本章では最小流域単位として単一斜面を用い，実地形上において空間的に分布している飽和透水係数が降雨流出に与える影響の把握を目的とし，不飽和浸透理論を用い流出計算を行った．

3.1 単一斜面における飽和透水係数の空間分布が降雨流出に与える影響（正規分布）

実斜面の土壌特性値を想定し，単一斜面において正規分布に従う乱数を用いる事により，飽和透水係数を空間的に分布させ計算を行うことにより降雨流出に与える影響を検討した．計算条件は，斜面長 $L=10m$ ，表層土層厚 $D=100cm$ ，有効空隙率 0.42，斜面勾配 $i=30^\circ$ 降雨強度 5mm/hr，降雨継続時間 9h $x=10cm$ ， $y=10cm$ ， $z=5cm$ ，単一斜面を鉛直方向に 5 層，斜面流下方向に 25 層，合計 125 グリッドに分割し，各グリッドに対して飽和透水係数を与えた．ここで飽和透水係数は，その平均値を 0.02cm/s とした正規分布に従う乱数で与えた．また，飽和透水係数の平均値の標準偏差を $\pm 10\%$ ， 30% ， 50% ， 70% ， 90% で与えることにより，ばらつきの程度を変えて計算を行い，空間分布を考慮しない各グリッド全てに飽和透水係数の平均値 0.02cm/s を与えた場合との比較を行った．計算結果を図-2 に示す．ピーク流出高で違いが見られるが，ハイドログラフの立ち上がり，逓減部ともに良く一致しているため，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と言える．次に，正規分布に従う乱数で与えた飽和透水係数を，小さい値の順に斜面上端部から下流方向へ並べた場合と，小さい値の順に斜面下端部から上流方向へ並べた場合の計算を行った．これらの計算結果を図-3，図-4 に示す．飽和透水係数の小さい値を斜面上端部から並べた場合は，斜面下端部に飽和透水係数の大きい値が集まるため，空間分布を考慮しない場合に比べ早く流出するが，影響は無視できる程度と考える．飽和透水係数の小さい値を斜面下端部から並べた場合は，標準偏差 $\pm 10\%$ ， 30% ， 50% ， 70% ， 90% と，ばらつきが大きくなるにつれて，ピーク流出高が低くなり，ピーク到達時間が遅くなることがわかる．これは，斜面下端部に飽和透水係数の低い値の土壌が集まることにより，流出しにくくなるためである．

3.2 単一斜面における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）

3.1 で扱った正規分布は対称な分布であるが，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い．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，単

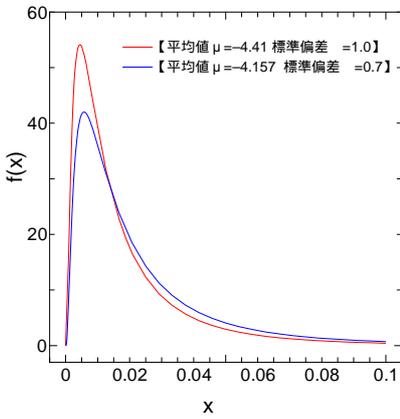


図-5 計算に用いた対数正規分布

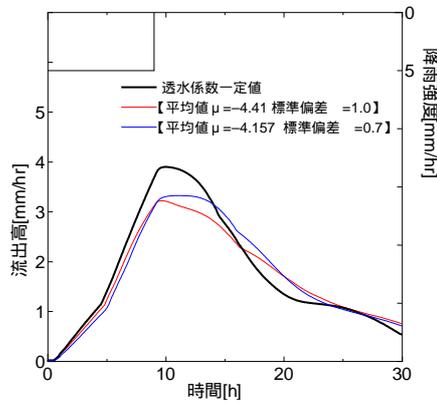


図-6 飽和透水係数の空間分布が降雨流出に与える影響[対数正規分布]

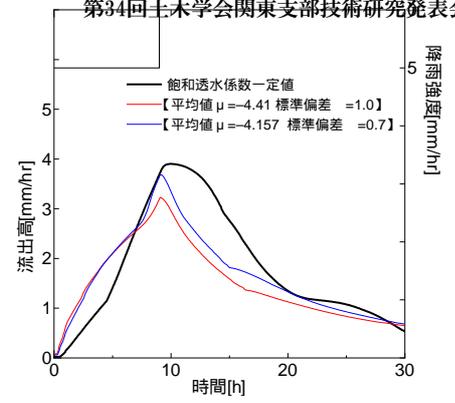


図-7 飽和透水係数の空間分布が降雨流出に与える影響[対数正規分布](飽和透水係数の小さい値を斜面上端部から並べた場合)

一斜面に飽和透水係数を空間的に分布させた。単一斜面を鉛直方向に5層、斜面流下方向に25層、合計125グリッドに分割し3.1と同様な計算条件を用い、飽和透水係数を対数正規分布に従う乱数で与え空間的に分布させた。用いた対数正規分布を図-5に示すとともに確率密度関数を(11)式に示す。

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

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 $\sigma = 1.0$]、[平均値 $\mu = -4.157$, 標準偏差 $\sigma = 0.7$]を用い、飽和透水係数の平均値を 0.02cm/s となるように計算を行った。計算結果を図-6、図-7、図-8、に示す。飽和透水係数を空間的に分布させた場合を図-6、飽和透水係数の小さい値を斜面上端部から並べた場合を図-7、飽和透水係数の小さい値を斜面下端部から並べた場合を図-8で示す。図-6、図-7、図-8、ともに飽和透水係数

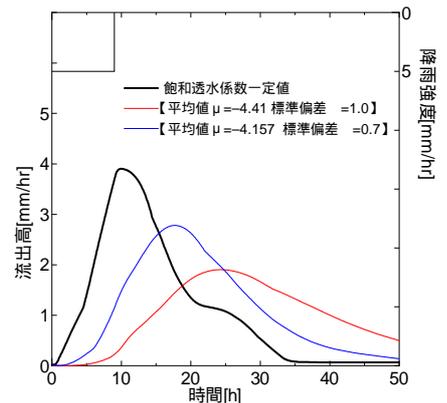


図-8 飽和透水係数の空間分布が降雨流出に与える影響[対数正規分布](飽和透水係数の小さい値を斜面下端部から並べた場合)

を正規分布に従う乱数で与えた場合と同様に、標準偏差が大きいとピーク流出高、ピーク到達時間に影響がでる。図-6に関してはピーク流出高で違いが見られるが、ハイドログラフの立ち上がり、逓減部ともに良く一致しているため、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ということが言える。図-7に関しては、ハイドログラフの立ちあがりには空間分布を考慮しない場合に比べ早く流出し、ピーク流出高で違いが見られるが、影響は無視できる程度と考える。図-8に関しては、ピーク流出高が低くなり、ピーク到達時間が遅くなることがわかる。以上の結果により、対数正規分布に従う乱数を用い、単一斜面に飽和透水係数を空間的に分布させた場合は、正規分布に従う乱数を用いたときと同様に、飽和透水係数が分布しているときや飽和透水係数の小さい値が斜面上端部に集中しているときは、飽和透水係数の空間分布による降雨流出への影響は小さいことを示した。

4. 水文特性の平面的な空間分布が降雨流出に与える影響

3章にて、単一斜面においては斜面末端に飽和透水係数の小さい値が集中しないかぎり、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がわかった。本章では流域水文特性の平面的な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た。2章で示した集中定数系方程式(5)式を用い、各サブ流域に対して流出計算を行った場合と流域全体で流出計算をした場合との比較検討を行った。計算条件としては、面積 100km^2 の仮想流域を想定し、その仮想流域を面積 5km^2 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で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 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 ±10% ,50% , 90% で与え,飽和透水係数を各サブ流域に正規分布に従う乱数で空間的に分布させ流出計算を行った .その結果を図-9, 図-10, に示す . 図-9 は標準偏差 ± 50% のときの各サブ流域における流出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影響がでていることがわかる .一方, 図-10 を見ると流出高ハイドログラフは全体で一致しており, 流域全体では飽和透水係数の空間分布による流出高の影響を無視できることがわかった .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 . 図-11, 図-12 に示されるよう流域全体での降雨流出に与える影響は少なく, 影響を無視できることがわかった . 以上により, 日本国内の流域特性を有し河道効果の無視できるような 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 .

5.まとめ

- 1) 単一斜面において, 飽和透水係数を正規分布, 対数正規分布に従う乱数で空間的に分布させたとき, 飽和透水係数が分布しているときや飽和透水係数の小さい値が斜面上端部に集中しているときは, 飽和透水係数の空間分布による降雨流出への影響は小さいことがわかり, この場合透水係数を一定値として扱えることを示した . 一方, 飽和透水係数の小さい値が斜面下端部に集中しているときは流出高ピーク値が小さく, 遅く算出されることを示した . これは斜面下端部に飽和透水係数が小さい値の土壌が集中し, 流出しにくくなっているためである . このことにより, 実地形上において斜面末端に難透水土壌があると, ハイドログラフの立ち上がり, 逡減部, ピーク流出高, ピーク到達時間に影響を及ぼすことを示した .
- 2) 河道効果の小さいような 100 km² 程度の流域スケールでは飽和透水係数, 有効空隙率, 表層土層厚の平面的な空間分布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 . これにより集中定数系方程式の流域への一元的な適用が可能であることを示した .

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

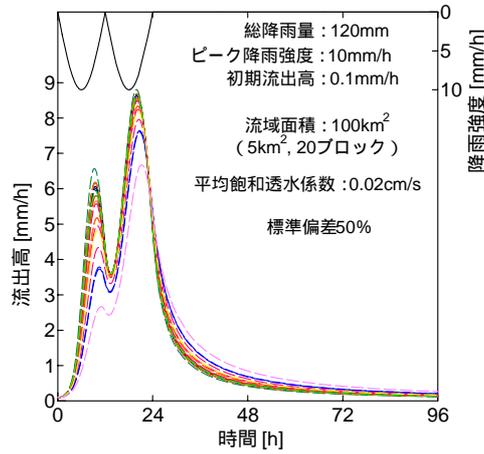


図-9 各サブ流域における流出高

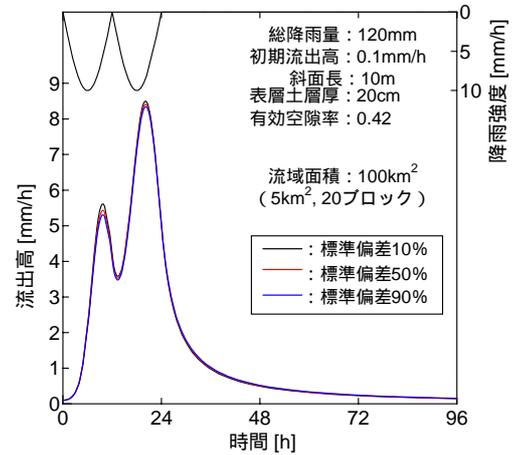


図-10 飽和透水係数の空間分布が降雨流出に与える影響

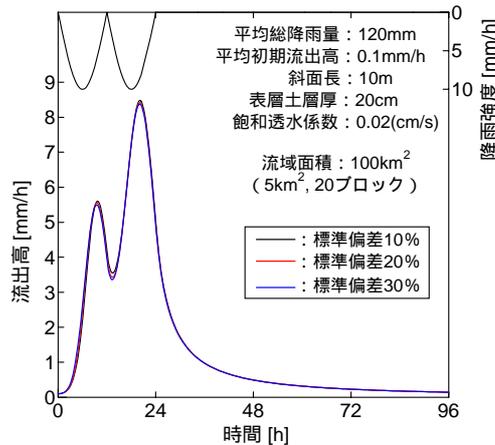


図-11 有効空隙率の空間分布が降雨流出に与える影響

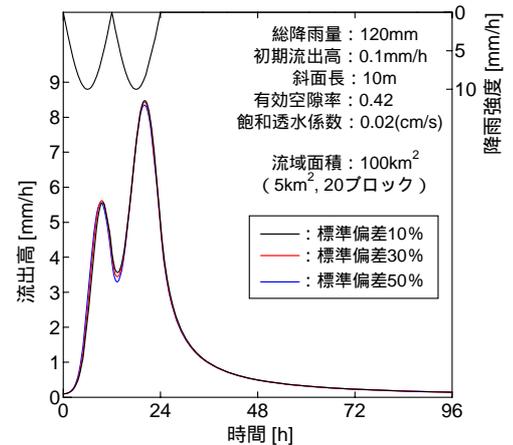


図-12 表層土層厚の空間分布が降雨流出に与える影響