

水文特性の空間分布が降雨流出に与える影響

中央大学大学院 学生員

○織田 賢太

中央大学大学院 学生員

岡部 真人

University of California, Davis 正会員

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・土砂災害を予測する上で非常に重要である。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。本稿は、水文特性の平均値を流域一様に与えたときと分布させたときに算出される流出ハイドログラフの比較検討を行い降雨流出に与える影響を評価することを目的としている。

2. 単一斜面における降雨流出の基礎式

著者らは従来から単一斜面における降雨流出の基礎式を提案している。一般化された断面平均流速(1)式と、連続式(2)式より(3)式に示す表面流に関する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]、 α 、 m は流域の流出特性を表すパラメータである。ここで、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(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)式が本研究における降雨流出を表す基礎式となる。

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

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r(t) \dots (2)$$

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

$$q(x, t) \cong x q_*(t) \dots (4) \quad \frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (r(t) - q_*) \dots (5) \quad a = (m+1) \alpha^{\frac{1}{m+1}}, \quad a_0 = a L^{\beta-1} = (m+1) \alpha^{\frac{1}{m+1}} L^{\frac{-1}{m+1}}, \quad \beta = \frac{m}{m+1}$$

(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とともに、斜面多層流れを考慮した(6)式を著者らは従来から提案している。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している。また、表面

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{dq_s}{dt} = a_s q_s^{\beta_s} (r(t) - q_0 - q_s) & \dots \text{表面流} \\ \frac{dq_*}{dt} = a_0 q_*^\beta (q_0 - q_*) & \dots \text{中間流} \\ \frac{dq_0}{dt} = (r(t) - q_0) \frac{q_0 - K_s}{h_s + h_k} - \frac{q_0 (q_0 - K_s)^2}{(\theta_s - \theta_i) K_s (h_s + h_k)} & \dots \text{鉛直浸透流} \\ \frac{dh_s}{dt} = r(t) - q_0 - q_s & \dots \text{湛水深} \end{array} \right. \dots (6)$$

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ている。表面流の発生機構に関しては高棹タイプとHortonタイプの表面流が考慮されている。(6)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。ここに、 k_s ：飽和透水係数、 q_s ：表面流に関する流出高[mm/h]、 q_0 ：鉛直浸透流[mm/h]、 h_s ：湛水深[cm]、 h_k ：湿潤線での毛管不圧[cm]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。以上が著者らのグループが従来から提案している手法の概容である。詳細に関しては文献1),2)などを参照されたい。

3. 水文特性の空間分布が降雨流出に与える影響

実流域において水文特性の空間分布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（流域面積2621[km²]）を対象とし81のサブ流域に分割し、各サブ流域において流域全体の平均値は一定のもと、飽和透水係数を対数正規分布に従う乱数で分布させた。分布

キーワード： 水文特性, 空間分布, 降雨流出

連絡先： 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部 TEL:03-3817-1805 FAX:03-3817-1803

の発生パターンは図-2に示す3種の対数正規分布を用い、各対数正規分布に基づき1セットずつ乱数を発生させた。case3の対数正規分布は0に近い値が集中しており対数正規分布よりも極端な分布形であるが、これは飽和透水係数の分布が極端な場合を想定している。また、河道部における洪水追跡に関しては、横流入を考慮した一次元不定流計算を行った。サブ流域における飽和透水係数以外の土壌地形特性として斜面長 $L=30[m]$ 、表層土層厚 $D=20[cm]$ 、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 $0.1[mm/h]$ を各サブ流域に一样に与えた。

3.1 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定量的に評価するため、流域全体の平均値は一定のもと飽和透水係数をサブ流域において対数正規分布に従う乱数で分布させた。図-3を見るとハイドログラフは立ち上がり、逓減部ともにほとんど差異は見られず、分布が極端な場合も含め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、飽和透水係数の流域平均値が一定の条件においては小さいことがわかる。

3.2 遅れ時間の分布が降雨流出に与える影響

次にサブ流域における流出計算においてcase3の対数正規分布を用いて飽和透水係数の分布を3セット発生させ、更に各セットごとに飽和透水係数の大小に応じて遅れ時間を分布（1時間～5時間）させ計算を行った。本論文では、遅れ時間をピーク降雨強度とピーク流量の時刻差として定義している。水文特性の空間分布に伴い生じる各サブ流域におけるピーク流量の遅れ時間の分布が降雨流出に与える影響を定量的に評価しようというものである。ここで本計算では、各飽和透水係数を用いた流出計算で生じる遅れ時間以外の遅れ時間に加えて更に人為的に横流入ハイドログラフに与えている。これは、遅れ時間の大小を簡易かつ明確に表現するためであり、このトータルの遅れ時間は飽和透水係数以外の土壌特性値（例えば、表層土層厚、有効空隙率など）を変化させたに算定されるものを想定している。遅れ時間の流域平均値は各計算で一定としている。図-4を見ると遅れ時間を分布させて計算した場合、ピーク流量に差が生じていることが分かる。これによりピーク流量のみならず、遅れ時間が各サブ流域において大きく異なる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が大きいことがわかる。

4. まとめ

渡良瀬川流域程度の空間スケール（流域面積 $2621[km^2]$ ）では、飽和透水係数の空間分布が降雨流出に与える影響は少なく平均値として飽和透水係数を扱えることを示した。しかしながら各サブ流域においてピーク流量の遅れ時間が大きく異なるような流域においては水文特性の空間分布を考慮した流出計算が必要であることを示した。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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

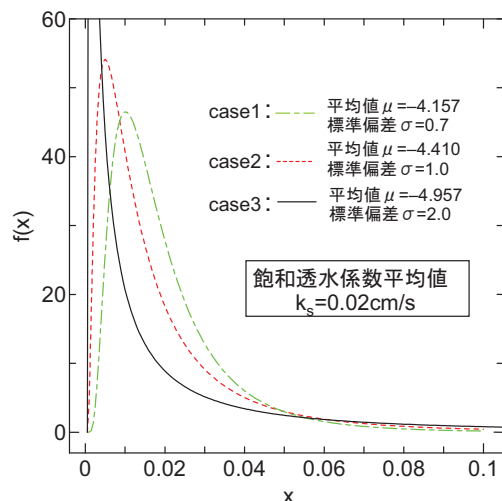


図-2 飽和透水係数の空間分布に用いた対数正規分布

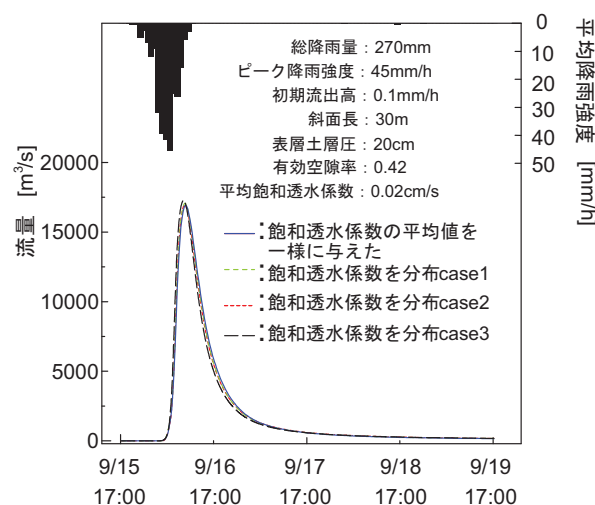


図-3 飽和透水係数の空間分布が降雨流出に与える影響

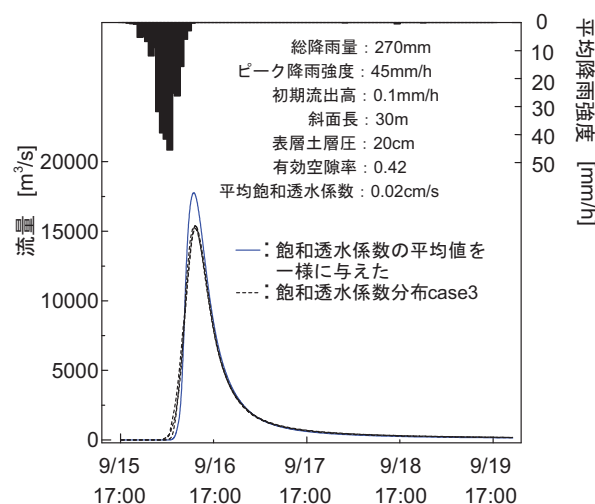


図-4 遅れ時間の分布が降雨流出に与える影響