

# 降雨流出現象における斜面効果と河道効果に関する研究

中央大学理工学部 学生員 重住 基 中央大学大学院 学生員 呉 修一  
中央大学理工学部 正会員 山田 正

**1. はじめに：** 降雨流出機構を把握することは、降雨災害の予測を考える上で重要であり、著者らは物理的観点に立脚した降雨流出計算手法を提案してきた。本論文は、運動則を一般化しつつ、集中化した斜面、河道における降雨流出計算手法を提案し、降雨流出現象における斜面効果と河道効果の特性について明らかにする。

## 2. 降雨流出の基礎式の導出：

**2.1. 単一斜面における降雨流出の基礎式の導出：** 様々な流出形態に対応させるため一般化された運動則を式(1)とし、連続式は式(2)で表される。式(1)を式(2)へ代入し  $q_s$  について整理すると式(3)の Kinematic Wave 方程式が得られる。ここに、 $v_s$ : 断面平均流速[mm/h]、 $h_s$ : 水深[mm]、 $q_s$ : 単位幅流量[mm<sup>2</sup>/h]、 $r(t)$ : 有効降雨量[mm/h]、 $\alpha_s, m$  は斜面における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ともに時事刻々と定常解を仮定すると、式(4)の変数分離形の近似式が成立する。ここに、 $q_{s^*}(t)$ : 流出高[mm/h]である。斜面長  $L$  の末端で考え  $x=L$  とすると式(3)は式(5)の流出高に関する常微分方程式に変形できる。

$$v_s = \alpha_s h_s^m, \quad q_s = v_s h_s = \alpha_s h_s^{m+1} \quad (1), \quad \frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = r(t) \quad (2), \quad \frac{\partial q_s}{\partial t} + a_s q_s^{\frac{m}{m+1}} \frac{\partial q_s}{\partial x} = a_s q_s^{\frac{m}{m+1}} r(t) \quad (3)$$

$$q_s(x, t) \cong x q_{s^*}(t) \quad (4), \quad \frac{dq_{s^*}}{dt} = a_s q_{s^*}^{\beta} (r(t) - q_{s^*}) \quad (5), \quad a_1 = (m+1)\alpha^{\frac{1}{m+1}}, \quad a_s = a_1 L^{\beta-1} = (m+1)\alpha^{\frac{1}{m+1}} L^{\frac{-1}{m+1}} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{m}{m+1} \quad (7), \quad \alpha_s = \frac{k_s i}{D^{\gamma-1} w^{\gamma}}, \quad \gamma = m+1 \quad (8)$$

式(5)は一般化した単一斜面からの降雨流出を表す基礎式となる。また山田ら<sup>1),2),3)</sup>は流出パラメータ  $\alpha_s, m$  を不飽和浸透理論と比較することにより、式(8)のように土壌地形特性から決定できることを示している。ここに、 $k_s$ : 飽和透水係数、 $i$ : 斜面勾配、 $D$ : 表層土層厚、 $\gamma$ : 透水性を表す無次元パラメータ、 $w$ : 有効空隙率である。以後本論文において式(5)を斜面における集中定数系方程式と記す。

**2.2. 河道における降雨流出の基礎式の導出：** 斜面同様、河道においては運動則を式(9)のマニング則で表し、式(10)の連続式より  $q_r$  について整理すると式(11)の Kinematic Wave 方程式が得られ、式(12)の変数分離形の近似式が仮定できる。ここに、 $h_r$ : 水深[m]、 $q_r$ : 単位幅流量[m<sup>2</sup>/s]、 $B$ : 河道幅[m]であり、マニング則を用いていることから  $mr=2/3$  とする。ここに、 $q_{r^*}(t)$ : 流出高、 $i_r$ : 勾配、 $n_r$ : 粗度係数 である。河道長  $L_r$  の末端で考え  $x=L_r$  とすると式(11)は式(13)の流出高に関する常微分方程式に変形できる。

$$v_r = \alpha_r h_r^{mr}, \quad \alpha_r = \frac{\sqrt{i_r}}{n_r} \quad (9), \quad \frac{\partial h_r}{\partial t} + \frac{\partial q_r}{\partial x} = \frac{2q_s(t)}{B} \quad (10), \quad \frac{\partial q_r}{\partial t} + a_r q_r^{\frac{mr}{mr+1}} \frac{\partial q_r}{\partial x} = a_r q_r^{\frac{mr}{mr+1}} \frac{2q_s(t)}{B} \quad (11)$$

$$q_r(x, t) \cong x q_{r^*}(t) \quad (12), \quad \frac{dq_{r^*}}{dt} = a_r q_{r^*}^{\beta_r} \left( \frac{2q_{s^*}(t) * L}{B} - q_{r^*} \right) \quad (13)$$

$$a_2 = (mr+1)\alpha_r^{\frac{1}{mr+1}}, \quad a_r = a_2 L_r^{\beta_r-1} = (mr+1)\alpha_r^{\frac{1}{mr+1}} L_r^{\frac{-1}{mr+1}} \quad (14)$$

式(13)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。以後本論文において式(13)を河道における集中定数系方程式と記す。式(5)、(13)を2元連立常微分方程式として解くことにより河道における流出高を求めることができる。

**2.3. 降雨流出過程の集中化の合理性：** 降雨流出過程の集中化の際に用いた式(4)、(12)の合理性を示すため式(3)、(11)を差分により求めた河道末端での流出高と、本論文で提案する式(5)、(13)、すなわち常微分方程式より求めた流出高との計算結果の比較を図-1に示す。計算条件としては降雨強度を sin 関数で与え、 $x=0.5$ [m]、 $t=0.1$ [s]として計算を行った。ここでの土壌、地形には、斜面において表層土層厚  $D=15$ cm、飽和透水係数  $k_s=0.001$  cm/s、有効空隙率  $w=0.42$ 、透水性を表す無次元パラメータ  $\gamma=5$ 、勾配  $i=1/9$  とし、河道においては河道長  $L_r=1000$ m、粗度係数  $n_r=0.030$ 、勾配  $i_r=1/50$  としている。斜面長を変化させた3ケースで双方に差があるものの、その差の範囲は流出高の1割程度であることから河道末端における流出高の評価には十分適応可能であり、本論文で提案する降雨流出過程の集中化は合理的であったといえる。

**3. 斜面効果と河道効果との比較：** 斜面及び河道が降雨流出現象に与える影響を見るため、河道の両側に長さ一様の斜面を考えた場合の斜面、河道における降雨流出計算を行う。計算条件は2.3の値と同様である。

キーワード 集中化, 斜面効果, 河道効果

連絡先 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部土木工学科 tel03-3817-1805 fax03-3817-1803

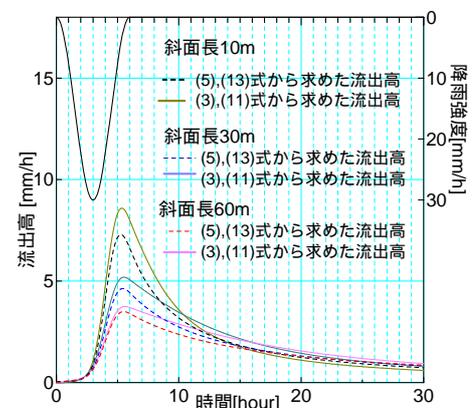


図-1 Kinematic Wave 方程式と集中定数方程式の解の比較

**3.1. 斜面末端と河道末端での流出高による比較:** 式(3)より求めた斜面末端における流出高と、式(3), (11)より求めた河道における流出高を図-2に示す。斜面長  $L=10\text{m}, 30\text{m}, 60\text{m}$  の全てのケースで、横流入量となる斜面におけるハイドログラフとその斜面からの流入を受ける河道でのハイドログラフがほぼ一致する。つまり流出高は、河道効果に比べ斜面効果が卓越するため、斜面末端における流出高が求めれば、式(11)を用いる必要のあった河道末端における流出高についても式(3)のみで推測できる。

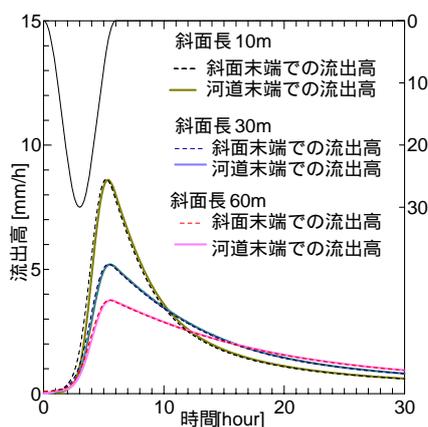


図-2 斜面末端と河道末端での流出高の比較

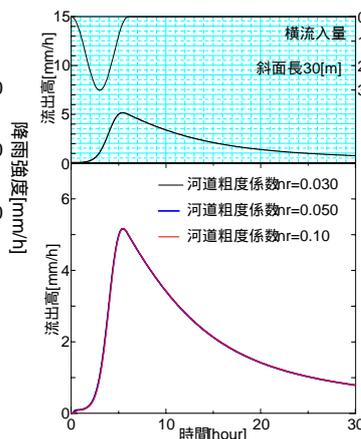


図-3 河道粗度係数変化

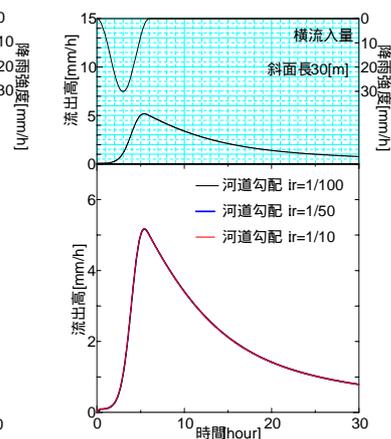


図-4 河道勾配変化

**3.2. 河道粗度係数と河道勾配の変化に対する影響:** 河道特性が流出高に与える影響を見るため、河道条件を変化させ計算を行った。まず、河道粗度係数を変化させて計算した結果を図-3に示す。河道粗度係数を変化させても、河道長 100m 程度、つまりは山地小流域の逕流程度では、河道末端での流出高には影響がないといえる。次に河道勾配を変化させて計算した結果を図-4に示す。粗度係数を変化させたとき同様、勾配変化もこの程度の流域であれば流出高に及ぼす影響は無視できるといえる。

**4. 河道に沿い空間的斜面長分布があるときの流出特性:** 3の計算では空間的に一様な矩形斜面を考え計算を行ったが、実地形上では空間的に斜面長が分布していると考えられる。そこで、河道に沿って空間的斜面長分布がある

ときの河道末端における流出計算を行った。斜面長分布は分布形(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-5に示すようなCASE1, CASE2, CASE3を用いた。流域面積一定(0.087 Km<sup>2</sup>)の条件下で、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。図-6に示すように、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で平均斜面長より流出高のピークが小さくなるのがわかる。これは降雨強度、土壌特性条件が一樣の下で、流域面積が増加すれば流出高のピークは下がることから、斜面長分布のあるときの流出高ハイドログラフは、平均斜面長を1.0倍以上した長さの斜面を空間的に与えることで得られる。ここで、平均斜面長は流域面積を2倍した河道長で割ったものとする。また、図-6では、平均斜面長の矩形斜面を与えたときの流出高比較を示すが、斜面長分布の緩やかなCASE1, CASE2では、平均斜面長を1.0~1.5倍した流域における流出高がこのハイドログラフのピークを表現できるといえるであろう。一方、斜面長分布の極端なCASE3においては、図-7に示す平均斜面長を2.0倍した矩形斜面を与えたときとの比較からハイドログラフのピークを表現できる。さらに本論文ではそこで求めた平均斜面長を条件に集中定数系方程式の合理性をみたが、結果は図-6, 図-7に示すように空間的斜面長分布のある河道末端の流出高においても集中定数系方程式は十分適応するといえる。

**5. まとめ:** (1)運動側を一般化しつつ、集中化した斜面、河道における降雨流出計算手法を提案し、その合理性を示した。(2)降雨流出現象において、斜面効果は河道効果に比べ卓越していることがわかった。(3)河道に沿って空間的斜面長分布のある流域ではその分布形式により平均斜面長を1.0~2.0倍することで河道末端での流出現象を表現できることがわかった。

参考文献: 1) 島田啓一, 山田正, 藤田睦博: 土木学会水理講演会論文集, V0.33, pp.133-138, 1989.  
2) 大原憲明, 池永均, 山田正, 尾崎宏, 内島邦秀: 年次学術講演開会講演概要集第2部, V0.47, pp.58, 59, 67-69, 1997.  
3) 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, V047, pp.259-264, 2003.

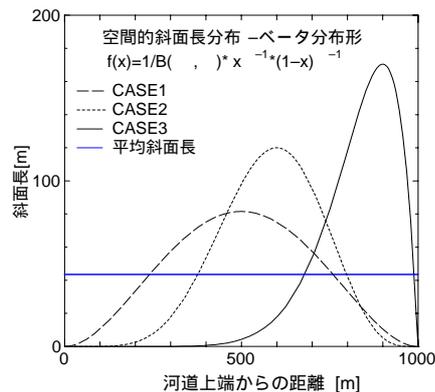


図-5 河道上端からの斜面長分布

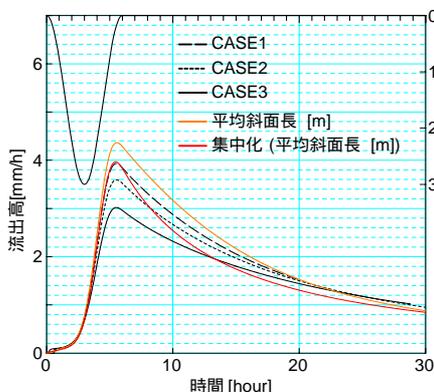


図-6 斜面長分布を変化させた場合の河道におけるハイドログラフ

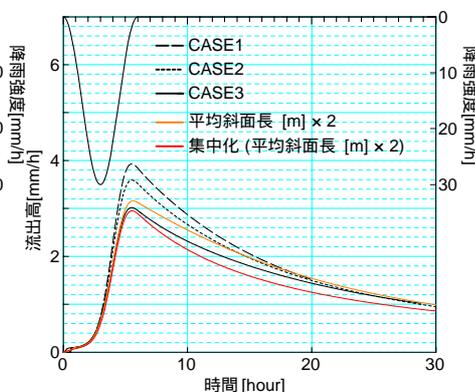


図-7 平均斜面長を2倍で与えた場合の河道におけるハイドログラフ