

1. まえがき

降雨が流出する過程を斜面系と河道系に分離し、矩形流域からの流出と考え、連続式、Manning 式を用い、特性曲線法で解析する方法はすでに多くの研究成果があるが、斜面系の等価粗度をあらかじめ得ることに苦労が多い。本文は特性曲線による解法に、無次元化を試み、任意の流域、降雨に対する単位図を求める方法を紹介し、¹⁾又単位降雨の流出特性を明確にし、更に実例洪水への適応性について述べたものである。

2. 総合単位図

等傾斜の矩形流域について、斜面巾 B 、斜面勾配 $\sin \theta$ 、斜面等価粗度 n 、河道長 L 、河道勾配 $\sin \phi$ 、河道粗度 N とし、単位時間降雨強度 I 、単位時間 T とすると

斜面系

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} &= I \\ q &= \frac{1}{n} h^{5/3} (\sin \theta)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

河道系

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= q \\ Q &= \frac{k}{N} A^P (\sin \phi)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$\Rightarrow$ に、 h : 斜面上の水深、 t : 降雨始めから t の時間、 x : 斜面尾根からの距離、 q : 斜面流量
 A : 河道流下断面積、 x : 河道上流端からの距離、 Q : 河道流量

式(1)、(2)に次の無次元変数を導入する

$$\begin{aligned} \text{斜面系} \quad t &= T \cdot \tau, \quad x = B \cdot \xi, \quad q = B \cdot I \cdot \psi, \quad h = h_* \cdot \zeta, \quad h_* = \left[\frac{B \cdot I \cdot n}{(\sin \theta)^{1/2}} \right]^{3/5} \\ \tau_s &= \left\{ T \cdot I^{3/5} \left| \left\{ \frac{(\sin \theta)^{1/2}}{n \cdot B} \right\}^{3/5} \right. \right\}^{5/2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{河道系} \quad x &= L \cdot \xi, \quad Q = B \cdot L \cdot I \cdot \psi, \quad A = A_* \cdot S, \quad P = 1.5, \quad A_* = \left\{ \frac{N \cdot B \cdot L \cdot I}{k \cdot (\sin \phi)^{1/2}} \right\}^{1/1.5} \\ \tau_r &= \left\{ T \cdot I^{3/5} \left| \left[B^{3/5} \left\{ \frac{k (\sin \phi)^{1/2}}{N \cdot L} \right\}^{3/5} \right] \right. \right\}^{5/2} \end{aligned}$$

式(1)、(2)は上記変数を代入すると

斜面系

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial (\tau_s \cdot \tau)} + \frac{1}{3} \tau_s^{3/5} \frac{\partial \psi}{\partial \xi} &= 1 \\ \psi &= \zeta^{5/3} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

河道系

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial (\tau_r \cdot \xi)} + 1.5 S^{0.5} \frac{\partial S}{\partial \xi} &= \psi \\ \psi &= S^{1.5} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(3)、(4)を境界条件に応じて解けば、斜面系、河道系の無次元流量 ψ 、 S は容易に求められる。 $\Rightarrow$ で、 τ_s 、 τ_r は流出の特徴を示す重要な無次元の物理量である。

斜面末端流量 (ψ)

- $\tau_s < 1$. 降雨中は増水し、降雨停止後に steady-flow が生じ、一定時間継続後減水する。
 $\tau_s = 1$. 降雨継続中増水し、降雨停止と同時に減水する。
 $\tau_s > 1$. 降雨継続中には steady-flow が生じ、降雨停止と同時に減水する。

河道末端流量 (ψ)

- $\tau_s < 1$. $\tau_r > \frac{5}{3} \left(\frac{\tau_s^{10}}{1 - \tau_s^5} \right)$ であれば、steady-flow が生ずる。 $\psi_{max} = \tau_s^{5/3}$
 $\tau_s > 1$. $\tau_r > \frac{1}{1 - \frac{1}{\tau_s}}$ であれば、steady-flow が生ずる。 $\psi_{max} = 1.0$

任意の τ_s , τ_r と与えれば、式(3), (4)から、河道末端の流量 ψ は随意計算されるが、今回 132 の単位図を得た。これを、統合単位図と称する。その一例を図-2 に示してある。単位図では、最大流量の大きさ ψ_{max} と、それが生ずる時間 τ_{max} 、及 α 、steady-flow が継続する時間 τ_{ste} が、容易に求まる。132 の統合単位図から得られた、それぞれの値を図-3, 4, 5 に示した。

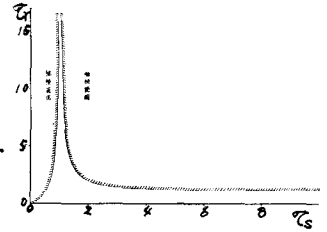


図-1. 河道末端で steady-flow が生ずる条件

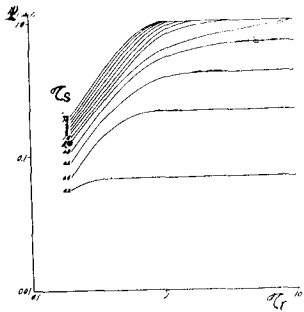


図-3. $\psi_{max} \sim \tau_r, \tau_s$

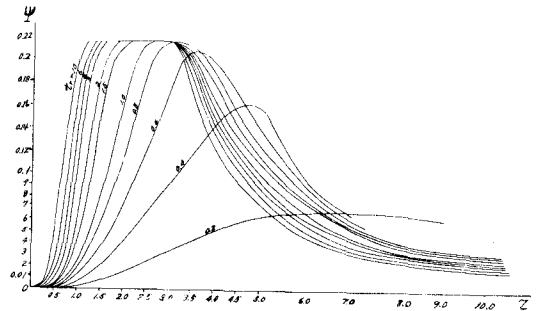


図-2. $\tau_s = 0.4$ の単位図

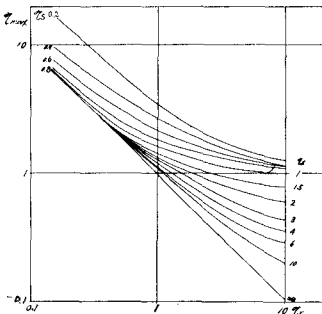


図-4. 降雨始めから ψ_{max} が生ずるまでの時間 τ_{max}

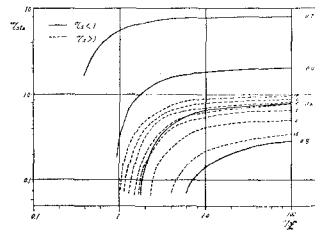


図-5. $\tau_{ste} \sim \tau_r, \tau_s$

τ_s, τ_r が与えられれば、単位図を模倣出し、逐次ハイドログラフと合成できる。計算手順は次のとおりである。

- (1) 流域条件 $B, L, \sin \theta'$ 、河道条件 $\sin \theta, k, N$ を地形図、河道断面図、流量観測成果から与える。
- (2) 洪水時の時間雨量、時間流量観測値から、 i_e (有効雨量)、単位時間 T 、遅れ時間 τ_{max} ($= \tau_e/T$) を求める。
- (3) τ_r, τ_{max} と図-4 から、 τ_s を求め、 n 値を得る。
- (4) n 値を得て、任意の降雨強度 i_e に対して、 τ_s, τ_r を算定し、用意した統合単位図から模倣 $Q = B \cdot L \cdot i_e \cdot \psi$ によって、流量を求める。
- (5) それぞれの単位降雨量に対する流量を合成する。

3. 北広島流出試験地への応用例

北広島流出試験地は表-1 に示すような流域諸元を有する、丘状地形の流域であり、北海道営の団地が、最下造成中である。昭和45年より土地利用の変化に伴って洪水流出がどのように変化するかを測定するため、水文観測を継続している。

これまでの洪水例から、最大時間雨量が卓越している洪水を模倣し、流出の遅れ時間を抽出したものが、図-6 である。($\tau_{max} = \tau_e/T, T = 1 \text{ hr}$)

これから、図-4 に示す、単位降雨量についての $\tau_{max} \sim \tau_r, \tau_s$ の関係を使用して、斜面の等価粗度 n を求めると図-7 のとおりである。

表-1. 北広島流出試験地流域諸元

河川名	流域面積	斜面名	B	$\sin \theta'$	L	k	$\sin \theta$	N
音江別川	9.67 km ²	I	970 ^m	0.0473	7,500 ^m	0.44	0.0160	0.020
		II	323	0.0475	7,500	0.44	0.0160	0.020

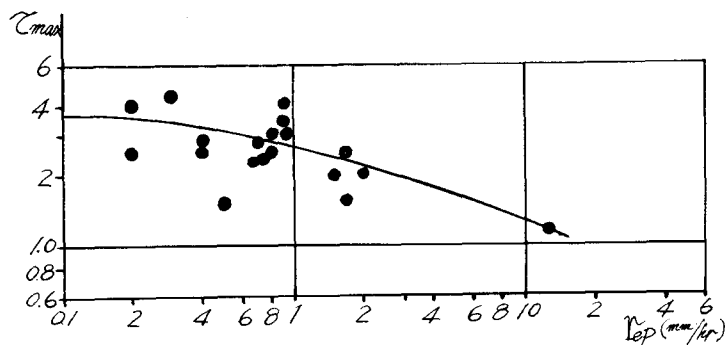


図-6 音江別川 $Q_p \sim \tau_{max}$ (音江別川)

実測値の τ_{max} は合成雨量 λ によるものであり、 λ_{ep} が卓越しているといえど、 τ_{max} を正しく抽出することはむづかしい。その結果が、 n のバラツキを大きくしているものと考えるが、 n は λ_{ep} と一定の関係があるようである。

これまでのデータは小規模の流出のものに限定されているが

$\lambda_{ep} = 0.2 \sim 2.0 \text{ (mm/hr)}$ では λ_{ep} の増加と共に、 n は増大し、 $\lambda_{ep} = 2 \sim$ では n は一定か、若しくは減少の傾向

があるようである。しかし、

多くの資料の蓄積を重ねてこれらの検証に移れた。Harry²⁾ の実験では、降雨強度が増加すると、流水の Friction Factor が増加することを指摘している。岸氏³⁾ は $\lambda_e = 2 \sim 6 \text{ mm/hr}$ の資料で n は増加していることを指摘している。

図-7 の実線を示す n を用いて、 τ_{max} を推定したものが、図-6 の実線であり、

これまでの成果を利用して、昭和46年10月5日の洪水を解析したものが、図-8 であり、総合単位図の適合性が良いことを示している。

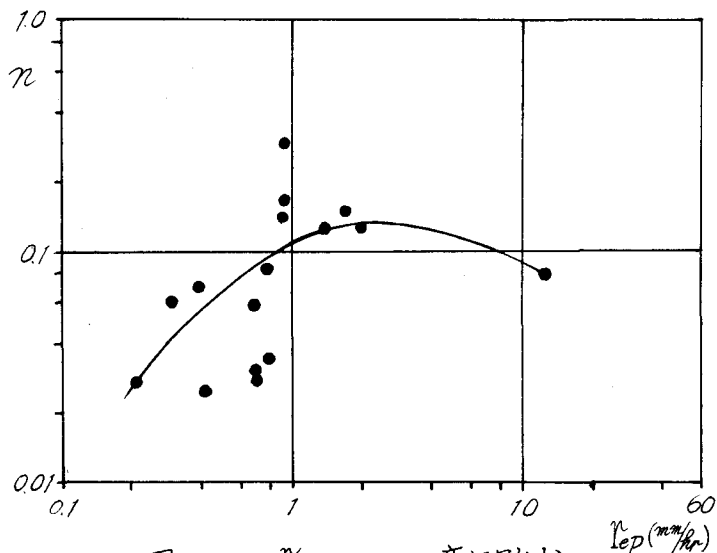


図-7 $\lambda_{ep} \sim n$ (音江別川)

参考文献

- 山口 茂 土流出系における総合単位図の基礎的研究。昭和47年3月
土木研究所報告 No. 58号
- Harry, G. Wenzel.
The Effects of Raindrop Impact and Surface Roughness on sheet flow.
Oct. 1970 Research Report No. 34
Univ. of Illinois.
- 岸力 中尾欣四郎
豊平川の洪水解析。昭和37年3月
北沢工学部研究報告 No. 28.

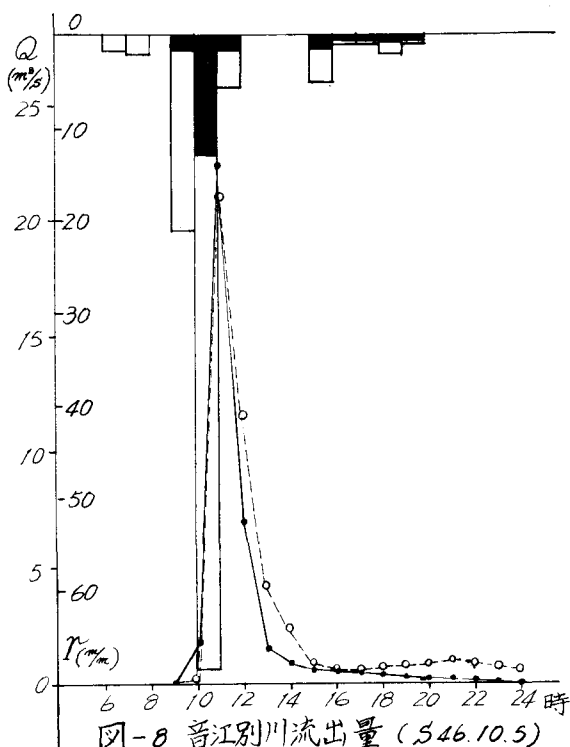


図-8 音江別川流出量 (S46.10.5)