

斜面・河道流域における雨水流の伝播特性
Concentration Time of Overland Flow in Basin Composed of
Inclined Planes and River Channel

神戸大学工学部 神田 徹 Tohru Kanda
神戸大学工学部 神吉 和夫 Kazuo Kanki
神戸大学大学院 吉岡 泰邦 Yasukuni Yoshioka

The kinematic wave method is applied to evaluating the concentration time of overland flow in the basin composed of inclined planes and river channel. Firstly, the relationship between concentration time and geographical features of the basin is made clear for rainfall of constant intensity. Secondly, we evaluate quantitatively the effect of unsteadiness of rainfall on concentration time and peak discharge. The result of computation shows that concentration time is greatly influenced by the equivalent roughness coefficient of planes, and the concentration time defined in this study for unsteady rainfall is almost equal to that for rainfall of constant intensity.

Keywords: runoff, overland flow, concentration time, kinematic wave

1. まえがき

洪水到達時間は合理式により洪水ピーク流出量を推定する場合の重要なファクターであり、その物理的意味や観測ハイト・ハイドログラフからの推定法について従来貴重な知見が得られているが^{1), 2)}、降雨波形や流域形状・地形が洪水到達時間にどのように関係しているかについては十分明確にされていない³⁾。本研究では、河道とその両側に矩形の等しい斜面を持つモデル流域にkinematic wave法を適用し、ピーク流出特性、特に洪水到達時間と斜面長、河道長、流域面積、地表面粗度等との関係を定量的に解明することにより、洪水伝播に及ぼす流域形状・地表状態の効果を基礎的に把握しようとするものである。また、本文で定義した洪水到達時間およびピーク流出量に対する降雨波形の非定常性の影響についても定量的評価を行う。

2. 流域形状・地表状態が洪水到達時間に及ぼす影響（定常降雨の場合）

2. 1 定常降雨に対する洪水到達時間

斜面流と河道流に対するkinematic waveモデルの基礎方程式は次式で表わされる。

$$\text{斜面流: } \partial h / \partial t + \partial q / \partial x = r \quad (1) \quad h = k q^p \quad (2)$$

$$\text{河道流: } \partial W / \partial t + \partial Q / \partial X = I \quad (3) \quad W = K Q^p \quad (4)$$

ここに、 r ：全斜面にわたり一様な有効降雨強度、

I ：河道単位長当りの横流入量（斜面末端の流量）、

k, p, K, P ：定数。

定常降雨 $r_o (= \text{const.})$ の場合、

斜面における雨水流の伝播時間

$t_{p.o}$ および斜面末端でのピーク

流出量 $q_{p.o}$ は

$$t_{p.o} = k b^p / r_o^{1-p} \quad (5)$$

$$q_{p.o} = r_o b \quad (6)$$

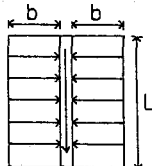


図-1 斜面・河道流域

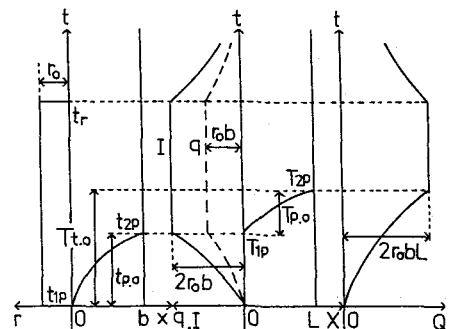


図-2 雨水擾乱の伝播過程

横流入量が $I_o (= \text{const.})$ のときの河道における伝播時間

$T_{p.o}$ および河道下流端でのピーク流出量 $Q_{p.o}$ は

$$T_{p.o} = KL^p / I_o^{1-p} \quad (7)$$

$$Q_{p.o} = I_o L \quad (8)$$

図-1の斜面・河道流域を対象とすると $I_o = 2q_{p.o} = 2r_o b$ となり、定常降雨に対する雨水擾乱の伝播過程は図-2に示すようになることから、洪水到達時間 $T_{t.o}$ およびピーク流出量 $Q_{p.o}$ は次のように表わされる。

$$T_{t.o} = \frac{k b^p}{r_o^{1-p}} + \frac{KL^p}{2^{1-p} (r_o b)^{1-p}} \quad (9)$$

斜面長と河道長の比 b/L 、流域面積 $A (= 2bL)$ を用いれば、式(9)は次のようになる。

$$T_{t.o} = \frac{k(b/L)^{p/2}(A/2)^{p/2}}{r_o^{1-p}} + \frac{K(b/L)^{-1/2}(A/2)^{p-1/2}}{2^{1-p} r_o^{1-p}} \quad (10)$$

$$Q_{p.o} = 2 r_o b L = r_o A \quad (11)$$

2.2 流域形状が洪水到達時間に及ぼす影響

流域形状が洪水到達時間に及ぼす影響を調べるため、勾配、粗度等の地表状態を表わすパラメータは一定値： $k=1.25$ 、 $K=1.0$ とした。まず、流域形状を表わす指標として、流域面積 A 、斜面長 b 、河道長 L をとり、 A 、 b/L をパラメータとして洪水到達時間 $T_{t.o}$ と降雨強度 r_o との関係を求めた結果を図-3に示す。なお斜面流定数 p は0.6、河道流定数 P は0.7とした。この図から、洪水到達時間と降雨強度は両対数紙上でほぼ直線的関係を示すが、 b/L によって直線の傾きが若干異なり、これが河道の効果と考えられる。

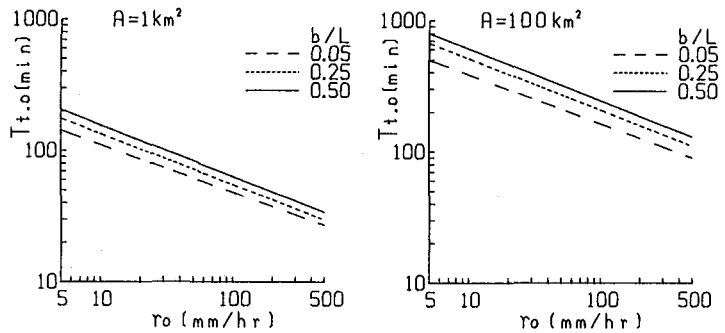


図-3 $T_{t.o} \sim r_o$ の関係

この河道効果を定量的に評価するため、斜面流の伝播時間に対する河道流の伝播時間の比 S_t をとれば

$$S_t = \frac{T_{p.o}}{t_{p.o}} = \frac{K(A/2)^{p-(1+p)/2}}{2^{1-p} k (b/L)^{(1+p)/2}} r_o^{p-p} \quad (12)$$

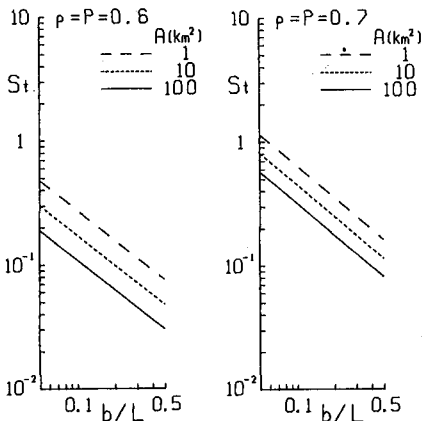


図-4 (1) $S_t \sim b/L$ の関係

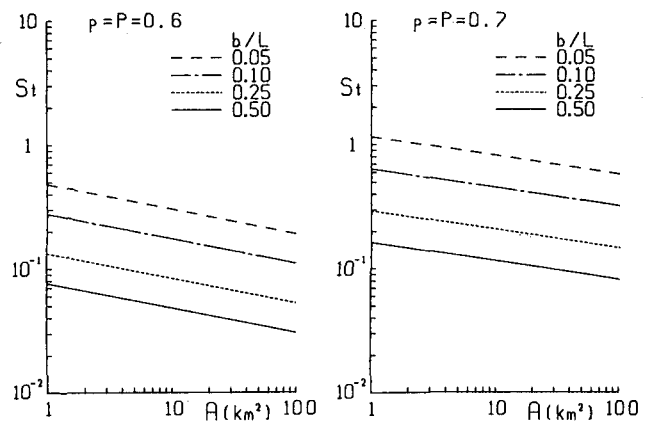


図-4 (2) $S_t \sim A$ の関係

$p = P$ のときには、降雨の影響が無視でき、式(12)は次式となる。

$$S_t = \frac{K(A/2)^{(p-1)/2}}{2^{1-p}k(b/L)^{(1+p)/2}} \quad (13)$$

式(13)より、 S_t と A 、 b/L との関係を示したものが図-4である。 A 、 b/L が大きいほど S_t は小さくなるが、 A よりも b/L の変化が S_t 値を大きく左右することがわかる。また、 p 、 P が小さいほど S_t 値は小さくなる。

図-4は流域形状を任意に変化させた時の河道効果を表わすものであるが、つぎに流域面積 A と b/L 値が一定の関係にあるとしたときの河道効果を調べる。いま、河道長 L と流域面積 A との間にHackの法則を仮定すると

$$b = \varepsilon B \quad (14) \quad B = A/L \quad (15) \quad L = u A^v \quad (16)$$

ここに、 ε ：主河道をはさむ流域幅 B に対する最大斜面長の比で、0.5~0.6程度、 u 、 v ：流域形状に関連する定数で、長さを km 単位にとると、 $u = 1.35 \sim 1.45$ 、 $v = 0.6 \sim 0.65$ 。

上式より、

$$b/L = (\varepsilon/u^2) A^{1-2v} \quad (17)$$

式(17)を式(12)に代入し、 $\varepsilon = 0.5$ 、 $u = 1.40$ 、 $v = 0.625$ とすると、 $p = 0.6$ 、 $P = 0.7$ 、 $K/k = 0.8$ の時、 S_t は次式となる。

$$S_t = 0.115 A^{0.1} r_o^{0.1} \quad (18)$$

ここに、 A ： km^2 、 r_o ： mm/hr 。

式(18)の関係を図示したものが、図-5である。この図では流域面積、降雨強度が大きいほど河道効果は大きくなっており²⁾、流域面積の影響については図-4とは逆の傾向である。これは、

図-4のように流域面積の増加に対する河道効果の減少の割合は小さく、 b/L の減少とともに河道効果が顕著に増大することと、Hackの法則によれば流域面積の増大とともに b/L が小さくなることによるものである。したがって、図-5の結果にもかかわらず、流域面積が大きくなると河道効果が大きくなるとは一概には言うことはできず、 b/L で代表される流域形状が河道効果の大小に強く係わっているといえよう。

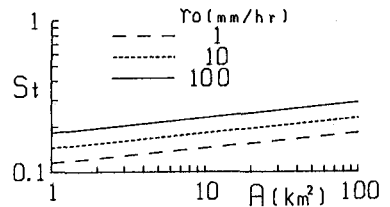


図-5 Hackの法則を用いた場合の河道効果

2.3 地表状態が洪水到達時間に及ぼす影響

地表状態が洪水到達時間に及ぼす影響を調べるため、流域形状はHackの法則により固定する。そして斜面の勾配、粗度、河道の K 値を変化させることにより、基準とする流域の洪水到達時間に対して各地表状態における洪水到達時間がそれぞれどの程度変化するかを調べる。流域形状は $A = 1 \text{ km}^2$ に対して $b/L = 0.25$ 、 $A = 10 \text{ km}^2$ に対して $b/L = 0.15$ 、 $A = 100 \text{ km}^2$ に対して $b/L = 0.08$ とする。

式(2)にマニング型の抵抗則を適用すれば、

$$k = (N/\sqrt{\sin \theta})^p, \quad p = 0.6 \quad (19)$$

ここに、 θ ：斜面勾配、 N ：等価粗度係数。

斜面の N 、 θ および河道の K の値を変化させることにより、各パラメータの $T_{t.o.}$ への影響を調べる。ただし、 $p = 0.6$ 、 $P = 0.7$ とする。降雨強度も影響するが、その影響は僅かであり、ここでは $r_o = 50 (\text{mm/hr})$ とした。基準とする流域の地表状態は $\theta = 10^\circ$ 、 $N = 0.7$ 、 $K = 1$ とし、この基準流域の洪水到達時間に対する各地表状態の洪水到達時間の比を U_t とする。 U_t と θ 、 N 、 K との関係をそれぞれ図-6(1)、(2)、(3)に示す。

流域面積が大きくなると、斜面における勾配や粗度の変化が洪水到達時間に与える影響は僅かに小さくなり、河道の K の変化の影響は僅かに大きくなる傾向が見られる。これは、流域形状にHackの法則を仮定しているので、流域面積が大きくなると斜面長に対して河道長がかなり大きくなり、斜面の地表状態の変化

が洪水到達時間に与える影響は相対的に小さくなり、逆に河道のKの変化の影響が大きくなるためと考えられる。しかし、流域面積の影響の度合は、量的には非常に僅かであるといえる。

斜面勾配の影響に関しては、図-6(1)のように θ が小さくなれば U_t はかなり大きくなる。これは θ がある値より小さくなると、式(19)における k の値が急激に大きくなることによる。これに比べて θ の増加の影響は少なく、 θ が 10° から 20° に変化しても洪水到達時間の短縮は20%程度である。このことから、斜面がかなり緩い勾配とならない限り勾配変化が洪水到達時間に与える影響は比較的小さいといえる。次に、等価粗度係数Nの変化が洪水到達時間に与える影響は大きく、特にNが小さくなるとその影響は極めて大きくなる。山林地流域($N=0.7$)に比べ、丘陵地に対応する $N=0.4$ では約30%、開発地に対応する $N=0.1$ では約60%ほど洪水到達時間は短くなる。また、河道のK値の影響は最大±20%程度であり、斜面勾配や斜面の粗度に比べるとその影響は少ないといえる。流域開発に伴う洪水到達時間の短縮はこれらの地表状態要素の変化が複合的に影響する結果であるが、特に地表の滑面化が主要な要因となり得ることを上述の結果は示すものである。

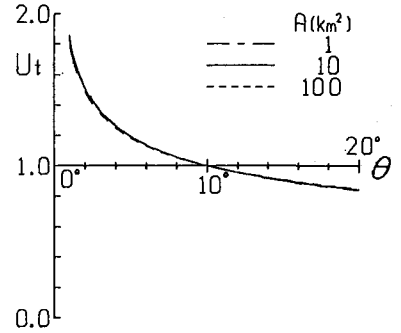


図-6(1) $U_t \sim \theta$ の関係

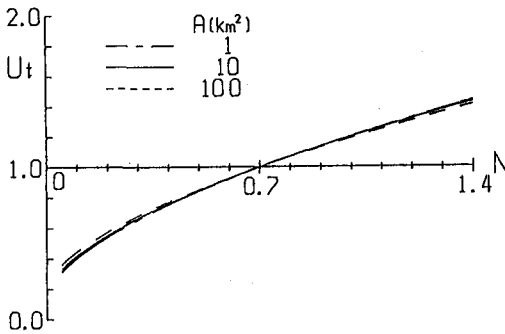


図-6(2) $U_t \sim N$ の関係

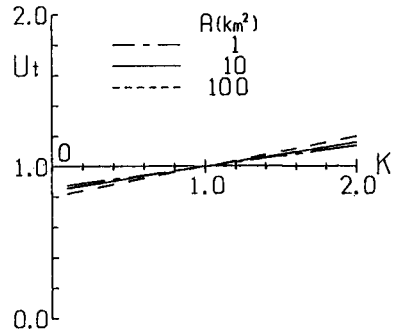


図-6(3) $U_t \sim K$ の関係

3. 降雨の非定常性が洪水到達時間、ピーク流出量に及ぼす影響

図-1に示す流域を対象として、降雨強度が時間的に変化する場合(非定常降雨)の洪水到達時間を定義し、その洪水到達時間と平均降雨強度の関係等を調べる。

3.1 洪水到達時間

式(1)~(4)を次の諸量を用いて無次元表示する。

$$t' = t/t_r, \quad x' = x/b, \quad h' = h/(r_p/2)t_r, \quad q' = q/(r_p/2)b, \quad r' = r/(r_p/2),$$

$$x' = x/L, \quad W' = W/(r_p/2)b t_r, \quad Q' = Q/(r_p/2)b L, \quad I' = I/(r_p/2)b$$

ここに、 r_p :ピーク降雨強度、 t_r :降雨継続時間、 b :斜面長、 L :河道長。

上記の無次元量を用いれば、式(1)~(4)は次のようになる。

$$\text{斜面流: } \partial h' / \partial t' + \partial q' / \partial x' = r' \quad (20) \quad h' = d * q' \quad (21)$$

$$\text{河道流: } \partial W' / \partial t' + \partial Q' / \partial x' = I' \quad (22) \quad W' = D * Q' \quad (23)$$

$$\text{ここに、} d* = \{k b^p / (r_p/2)^{1-p} t_r\}^{1/p} \quad (24) \quad D* = \{K b^{p-1} L^p / (r_p/2)^{1-p} t_r\}^{1/p} \quad (25)$$

図-1に示す斜面・河道流域を対象として式(24)、(25)を書き直すと

$$d* = \left\{ \frac{k(A/2)^{p/2}(b/L)^{p/2}}{(r_p/2)^{1-p} t_r} \right\}^{1/p} \quad (26) \quad D* = \left\{ \frac{K(A/2)^{p-1/2}(b/L)^{-1/2}}{(r_p/2)^{1-p} t_r} \right\}^{1/p} \quad (27)$$

降雨波形は、降雨継続時間が t_r 、ピーク降雨強度が r_p の対称な三角波形とする。無次元量で表わせば、図-7に示す降雨継続時間が1、ピーク降雨強度が2の三角波形降雨となる。

図-7において、河道下流端でのピーク流出量 Q_p' の発生時刻 T_{2p}' と特性曲線の斜面上流端出発時刻 t_{1t}' との時間間隔を洪水到達時間と定義する。

$$T_t' \equiv T_{2p}' - t_{1t}' \quad (28)$$

この T_t' は p, d^*, P, D^* を与えれば式(20)~(23)から定まる。

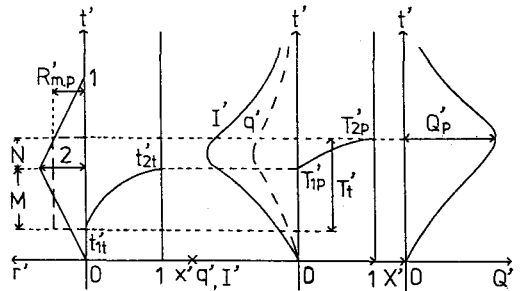


図-7 非定常降雨に対する洪水到達時間

3.2 降雨の非定常性の影響

p, d^*, P, D^* を与えて式(20)~(23)を数値計算で解き、 T_t' および Q_p' を求めた。 $p=0.6, P=0.7, k=1.25, K=1.0$ とし、 r_p と t_r の種々の組合せについて計算を行った。 T_t' とこの T_t' 内の平均降雨強度 $R_{m.p}'$ との関係をプロットしたものが図-8である。ただし、 $A, b/L$ の値はHackの法則により、 $A=1\text{km}^2$ に対して $b/L=0.25, A=10\text{km}^2$ に対して $b/L=0.15, A=100\text{km}^2$ に対して $b/L=0.10$ とした。図中の実線は定常降雨に対する関係である。なお、 $T_t, R_{m.p}$ は有次元量で表わしてある。この図から、 T_t と $R_{m.p}$ はほぼ直線の関係を示し、また定常降雨の場合の関係との差は極めて小さいことがわかる。

洪水到達時間の非定常降雨による影響を指標 E_t で評価する。

$$E_t = (T_t' - T_{t.o}') / T_{t.o}' \quad (29)$$

ここに、 $T_{t.o}'$:定常降雨に対する洪水到達時間。

同様に、ピーク流出量に関して降雨の非定常性の影響について調べるため、次の指標を用いる。

$$E_q = (Q_p' - Q_{p.o}') / Q_{p.o}' \quad (30)$$

ここに、 $Q_{p.o}'$:定常降雨に対するピーク流出量($=2R_{m.p}'$)。

種々の降雨と流域面積について E_t, E_q を算出した結果を図-9, 10に示す。 E_t, E_q

ともに降雨強度・継続時間、流域面積、流域形状とはほとんど無関係で、パラメータ:

$$M = 0.5 - t_{1t}' \quad (31)$$

のみに関係する。

図-7から明らかなように、 M が大きければ降雨継続時間に占める洪水到達時間が長くなるため非定常性の影響が大きくなり E_t, E_q が増大するのは当然といえるが、その非定常効果を M のみで評価できるということは興味ある結果

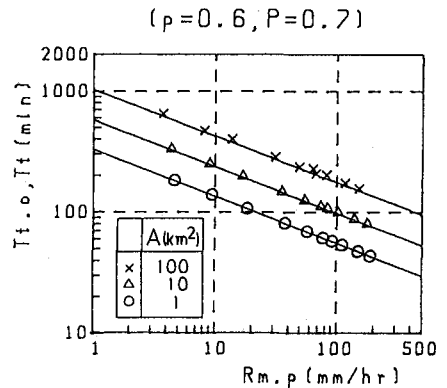


図-8 $T_t \sim R_{m.p}$ の関係

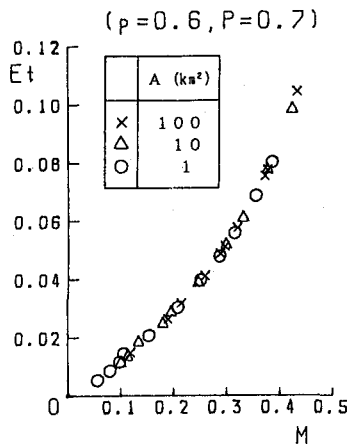


図-9 $E_t \sim M$ の関係

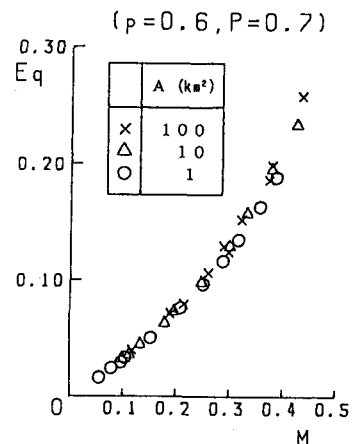


図-10 $E_q \sim M$ の関係

である⁴⁾。

そこで、 k 、 K 、 p 、 P 、 A 、 b/L を固定し、 r_p と t_r に対して M の値を求めたものが図-11である。図のように、流域面積が小さいほど M の値が小さくなる降雨波形の範囲は大きくなり、また流域面積が一定であれば r_p 、 t_r が大きくなるほど M の値は小さくなり、概して言えば総降雨量に比例して M の値は小さくなる。例えば、流域面積が 10 km^2 程度であれば、 M の値が 0.3 以下となる降雨波形(r_p 、 t_r の組合せ)は実際にしばしば観測される。そのような降雨に対しては、図-9より E_t は 5% 以下であることから、定常降雨の場合とほぼ等しい洪水到達時間を与えるということができる。一方、ピーク流出量は図-10より 10% 以上の差があり非定常効果は無視できないが、 M の値が約 0.2 以下となれば定常降雨の場合のピーク流出量と近似的に等しくなる。

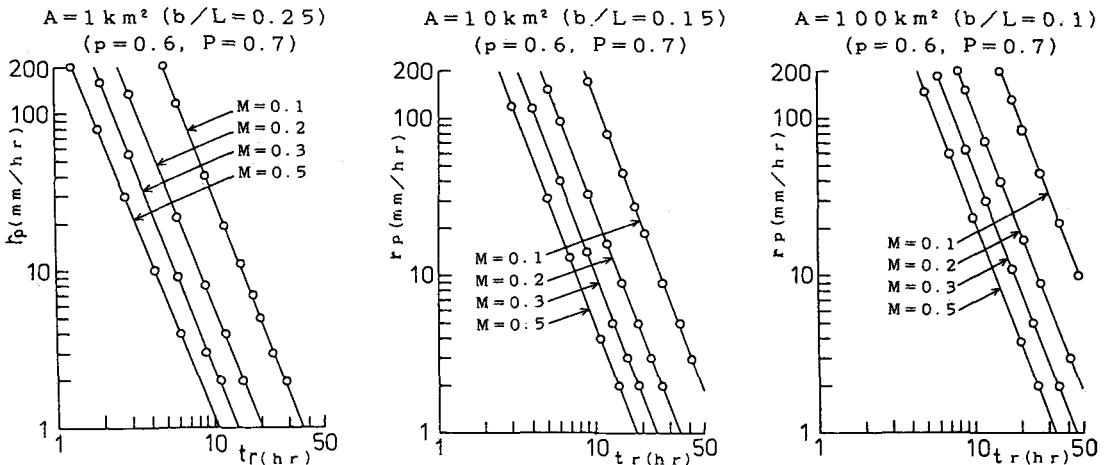


図-11 $M \sim r_p, t_r$

4. 結 論

(1) 洪水到達時間における河道効果、すなわち斜面流の洪水到達時間に対する河道流の洪水到達時間の比が、流域面積および斜面長と河道長の比といかなる関係にあるかを明らかにした。

(2) 地表状態を表すパラメータのうち斜面の粗度が大きく洪水到達時間に影響し、等価粗度係数の減少とともに洪水到達時間は大幅に短縮する。斜面勾配は勾配が小さい範囲で洪水到達時間に与える影響は大きく、河道の粗度が洪水到達時間に与える影響は比較的小さい。

(3) 非定常降雨の場合の斜面・河道流域における洪水到達時間を本文のように定義するとき、それとその時間内の平均降雨強度との関係は、強度が等しい定常降雨に対する両者の関係とほぼ一致する。

(4) 洪水到達時間とピーク流出量のいずれについても、非定常降雨の場合と定常降雨の場合の差は本文中のパラメータ M (式(31))のみによって定量評価できる。

終わりに、本研究の数値計算に御助力を得た神戸大学学生田中俊行君に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 石原・高棹：単位図法とその適用に関する基礎的研究，土木学会論文集，60号別冊3-3, 1959.
- 2) 角屋・福島：中小河川の洪水到達時間，京大防災研年報，19号B-2, 1976.
- 3) 神田・前田：非定常降雨による斜面流の伝播時間，第30回水理講演会論文集，1986.
- 4) 神田・神吉・元木沢・黒沢：斜面-河道系流域の洪水到達時間，土木学会第43回年次学術講演会，1988.