

斜面流域における洪水到達時間の推定

ESTIMATION OF TIME OF CONCENTRATION FOR OVERLAND FLOW ON A SLOPING PLANE

神田 徹*・神吉和夫**・吉岡泰邦***

By Tohru KANDA, Kazuo KANKI and Yasukuni YOSHIOKA

The time of concentration for surface runoff is the important factor of the rational formula. The propagation process of overland flow on a sloping plane for unsteady rainfall is investigated using the kinematic wave theory. The relationship between time of concentration and mean rainfall intensity during the time is theoretically revealed. Based on such a relationship, we propose the method of estimating the time of concentration from the observed hyetographs and hydrographs. The proposed method is verified through applying it to several river basins. We can appropriately account for the runoff characteristics of each basin by comparing the estimated time of concentration with the geographical factors of the basin.

Keywords: runoff, time of concentration, overland flow, rational formula

1. まえがき

本研究は、単一斜面の流域モデルにおいて降雨強度が時間的に変化する場合の雨水擾乱の伝播特性を理論的に調べ、その特性をもとに観測ハイエトグラフとハイドログラフから洪水到達時間を推定する方法を提示し、実流域の観測資料への適用を行ったものである。

洪水流出のピーク流量を推定するために用いられる合理式は形式上きわめて簡単な式で表わされているが、そこに含まれる諸量を各流域に対して定めることは決して容易ではない¹⁾。その1つが対象流域の洪水到達時間をどう決めるかという問題であり、水文観測が行われておれば実測ハイエトグラフとハイドログラフから洪水到達時間の推定を行わねばならない。

洪水到達時間の概念は古くからあるが、定義自体いまだ明確には統一されていない^{2),3)}。後述する kinematic wave 理論に基づく定義は物理的意味も明解であるし、またその定義による洪水到達時間と降雨強度との関係が流域の流出特性をよく表わすことなどからも適切な定義

であると考えられる。この kinematic wave 理論に基づいた洪水到達時間に関しては、理論的考察および実流域での実証的検討が従来行われているが⁴⁾⁻¹¹⁾、なかでも石原・高棟⁴⁾、角屋・福島¹¹⁾の研究成果をもとにした洪水到達時間推定式や建設省土研式¹⁰⁾などが実用公式としてわが国ではよく用いられている¹²⁾。これらの推定式に対しては種々の流域への適用をさらに重ねて経験的な検証を行う必要がある一方^{13),14)}、雨水の伝播過程に関する理論的検討によってその妥当性あるいは適用性をより明確にしなければならない¹⁵⁾⁻¹⁷⁾。

この洪水到達時間に関して本研究が焦点を当てたところは、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～降雨強度の関係から、時間的に一定な降雨強度（定常降雨）に対する洪水到達時間～降雨強度の関係を求める方法についてである。結果的には、洪水到達時間を本文で示すように決めれば非定常降雨の場合の関係は定常降雨の場合の関係とほとんど一致するので、合理式などで必要な後者の関係は前者の関係で代用することができる。そこで本研究では、前者の関係、すなわち非定常降雨に対する洪水到達時間～降雨強度関係を観測ハイエトグラフ・ハイドログラフから推定する方法を検討する。また、その推定法をいくつかの流域の観測資料に適用して各流域の流出特性を比較するととも

* 正会員 工博 神戸大学教授 工学部土木工学科

(〒657 神戸市灘区六甲台町1-1)

** 正会員 工修 神戸大学助手 工学部土木工学科(同上)

*** 正会員 工修 川崎製鉄(株) エンジニアリング事業部
(〒100 千代田区内幸町2-2-3)

に、本推定法の妥当性を調べる。

なお、本論文の2.の内容は文献15)に発表したのが、本研究はそれを発展させたものである必要部分をまとめ直して再記する。

2. 非定常降雨に対する洪水到達時間

(1) 洪水到達時間の定義

図一に示すような幅および勾配が一定の斜面において、表面流の伝播特性をもとに洪水到達時間を以下のように定義する。

斜面上の流れに対する kinematic wave モデルの基礎方程式は

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \dots\dots\dots (1)$$

$$h = kq^p \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 h ：水深、 q ：単位幅流量、 $r = r(t)$ ：全斜面にわたり一様な有効降雨強度、 k 、 p ：斜面流定数

$$\text{境界条件：} h(0, t) = q(0, t) = 0 \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{初期条件：} h(x, 0) = q(x, 0) = 0 \dots\dots\dots (4)$$

式(1)、(2)に特性曲線法を適用し(図二)、特性曲線に沿って斜面の上流端($x=0$)から下流端($x=b$)まで積分すれば

$$q_{x=b} = \left(\frac{1}{k} h_{x=b} \right)^{1/p} = \left(\frac{1}{k} \int_{t_1}^{t_2} r dt \right)^{1/p} \dots\dots\dots (5)$$

$$b = \frac{1}{pk^{1/p}} \int_{t_1}^{t_2} \left(\int_{t_1}^u r dt \right)^{1-p/p} du \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $h_{x=b}$ ：斜面下流端($x=b$)での水深、 $q_{x=b}$ ：下流端での流出量、 b ：斜面長、 t_1 、 t_2 ：特性曲線の上流端での出発時刻、下流端での到着時刻

さて、下流端での流出量が最大値をとるときの雨水擾乱の伝播時間、すなわち特性曲線の出発から到着までの時間を洪水到達時間と定義する。

$$t_p \equiv t_{2p} - t_{1p} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 t_p ：洪水到達時間、 t_{1p} 、 t_{2p} はそれぞれ、 $x=0$ での特性曲線の出発時刻、 $x=b$ での到着時刻で、 $t_2 = t_{2p}$ において流出量は最大値(ピーク流出量) q_p をとる。

この t_p は次のようにして求めることができる。

式(5)を微分してゼロとおけば、流出量ピークの条件が次のように与えられる。

$$\left(\frac{dt_1}{dt_2} \right)_{t_2=t_{2p}} = \frac{r(t_{2p})}{r(t_{1p})} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $r(t_{1p})$ 、 $r(t_{2p})$ ： $t=t_{1p}$ 、 $t=t_{2p}$ の降雨強度。降雨波形 $r(t)$ が与えられれば、 $(dt_1/dt_2)_{t_2=t_{2p}}$ は t_{1p} 、 t_{2p} の関数である。

式(6)、および式(6)を t_2 で微分した式のおおのについて $t_1=t_{1p}$ 、 $t_2=t_{2p}$ とおけば、これらの2式と式(8)から t_{1p} 、 t_{2p} が求まり、 t_p が得られる。

また、この洪水到達時間内の平均降雨強度は次式で与えられる。

$$r_{m,p} = \frac{1}{t_p} \int_{t_{1p}}^{t_{2p}} r dt \dots\dots\dots (9)$$

ピーク流出量は

$$q_p = \left(\frac{1}{k} \int_{t_{1p}}^{t_{2p}} r dt \right)^{1/p} = \left(\frac{r_{m,p} t_p}{k} \right)^{1/p} \dots\dots\dots (10)$$

特別の場合、すなわち定常降雨： $r = r_0 = \text{const}$ (p 値に無関係)、あるいは線形流出： $p=1$ (降雨の定常、非定常に無関係)の場合に限って、式(8)は次のようになる。

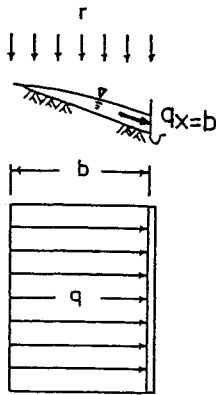
$$\left(\frac{dt_1}{dt_2} \right)_{t_2=t_{2p}} = 1, \quad r(t_{1p}) = r(t_{2p}) \dots\dots\dots (11)$$

すなわち、特性曲線の出発時刻と到着時刻(流出量ピーク時刻)の降雨強度は等しい。したがって、図三に示すように降雨強度が等しくなる時刻の間隔が洪水到達時間と一致する。

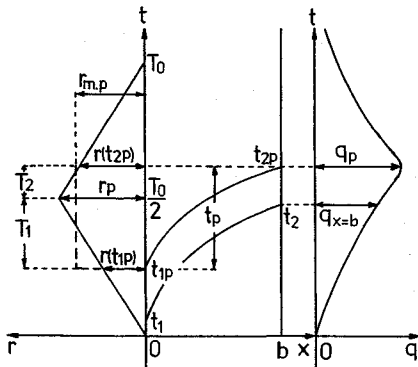
また、この場合には洪水到達時間とピーク流出量は次のように与えられる。

$$t_p = \frac{kb^p}{r_{m,p}^{1-p}} \dots\dots\dots (12)$$

$$q_p = r_{m,p} b \dots\dots\dots (13)$$



図一 斜面流域モデル



図二 雨水擾乱の伝播過程

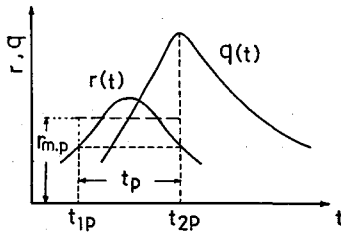


図-3 洪水到達時間の慣用的な定義

定常降雨 ($r = r_0$) の場合は次式が成立する。

$$t_{p,0} = \frac{kb^p}{r_0^{1-p}} \dots\dots\dots (14)$$

$$q_{p,0} = r_0 b \dots\dots\dots (15)$$

この特別の場合を除いて、非定常降雨でかつ $p \neq 1$ の場合には図-3で表わされる式 (11) の関係は成立せず、また t_p, q_p は厳密には式 (12), (13) では与えられない。

一方、非定常降雨でかつ $p \neq 1$ の場合に、もし図-3に示すような時間間隔を洪水到達時間と定義するならば、その洪水到達時間およびピーク流出量と平均降雨強度の関係もまた式 (12), (13) では与えられないことに注意する必要がある。それゆえ、その場合の $t_p \sim r_{m,p}$ 関係と $q_p \sim r_{m,p}$ 関係が、 $r_0 = r_{m,p}$ である定常降雨強度 r_0 に対する各関係、すなわち式 (14), (15) の関係に近いということは保証されていない。したがって、合理式などで必要な定常降雨に対する洪水到達時間～降雨強度関係を図-3のような洪水到達時間のとり方をもとに推定する方法¹²⁾には、上述の点で検討の余地がある。

そこで本研究では、定常降雨の洪水到達時間～降雨強度関係との整合性にも関心を置きつつ、非定常降雨に対する洪水到達時間～平均降雨強度関係の検討等を行う。

(2) 三角波形降雨に対する洪水到達時間

降雨強度の時間変化が図-2のように降雨継続時間 T_0 、ピーク降雨強度 r_p の対称な三角波形であるとする。この降雨に対して、式 (6), (8) はそれぞれ次のように表わされる。

$$b = \frac{1}{pk^{1/p}} \left(\frac{r_p}{T_0} \right)^{(1-p)/p} \left\{ \int_{t_1}^{T_0/2} (t^2 - t_1^2)^{(1-p)/p} dt + \int_{T_0/2}^{t_2} \left(-t^2 + 2T_0t - \frac{1}{2}T_0^2 - t_1^2 \right)^{(1-p)/p} dt \right\} \dots\dots\dots (16)$$

$$\left(\frac{dt_1}{dt_2} \right)_{t_2=t_{2p}} = \frac{T_0 - t_{2p}}{t_{1p}} \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 $0 \leq t_1 \leq T_0/2, T_0/2 \leq t_2 \leq T_0$

$r_{m,p}$ および q_p は、式 (9), (10) からそれぞれ次のように与えられる。

$$r_{m,p} = \frac{r_p}{t_p T_0} \left(-t_{2p}^2 + 2T_0t_{2p} - \frac{1}{2}T_0^2 - t_{1p}^2 \right) = r_p \left(1 - \frac{T_1^2 + T_2^2}{t_p T_0} \right) \dots\dots\dots (18)$$

ここに、

$$T_1 = \frac{T_0}{2} - t_{1p} \quad (0 \leq T_1 \leq T_0/2) \dots\dots\dots (19)$$

$$T_2 = t_{2p} - \frac{T_0}{2} \quad (0 \leq T_2 \leq T_0/2) \dots\dots\dots (20)$$

$$(T_1 + T_2 = t_p)$$

$$q_p = \left(\frac{r_p}{k T_0} \right)^{1/p} \left(-t_{2p}^2 + 2T_0t_{2p} - \frac{1}{2}T_0^2 - t_{1p}^2 \right)^{1/p} \dots\dots\dots (21)$$

p が特定の値をとるときには式 (16) の積分が可能で、 k, b, r_p, T_0 が与えられれば、 t_{1p}, t_{2p}, t_p (あるいは T_1, T_2) および $r_{m,p}, q_p$ は以下のように求めることができる¹⁵⁾。

(i) $p=1$ の場合

$$t_{1p} = \frac{T_0 - kb}{2} \dots\dots\dots (22)$$

$$t_{2p} = \frac{T_0 + kb}{2} \dots\dots\dots (23)$$

$$T_1 = T_2 = \frac{kb}{2} \dots\dots\dots (24)$$

$$t_p = 2T_2 = kb \dots\dots\dots (25)$$

$$r_{m,p} = r_p \left(1 - \frac{kb}{2T_0} \right) \dots\dots\dots (26)$$

$$q_p = r_{m,p} b = r_p b \left(1 - \frac{kb}{2T_0} \right) \dots\dots\dots (27)$$

(ii) $p=2/3$ の場合

$$m \equiv \frac{T_1}{T_0} \quad (0 \leq m \leq 0.5) \dots\dots\dots (28)$$

$$n \equiv \frac{T_2}{T_0} \quad (0 \leq n \leq 0.5) \dots\dots\dots (29)$$

とおけば、

$$\begin{aligned} & (m - m^2)^{1/2} - \left(\frac{1}{2} - m \right)^2 \ln \left\{ \left(\frac{1}{2} + \sqrt{m - m^2} \right) / \right. \\ & \left. \left(\frac{1}{2} - m \right) \right\} - \left(\frac{1}{2} - n \right) (m - m^2 + n - n^2)^{1/2} \\ & - \left(\frac{1}{4} + m - m^2 \right) \left[\sin^{-1} \left\{ \left(\frac{1}{2} - n \right) / \right. \right. \\ & \left. \left. \left(\frac{1}{4} + m - m^2 \right)^{1/2} \right\} - \sin^{-1} \left\{ \left(\frac{1}{2} \right) / \left(\frac{1}{4} + m - m^2 \right)^{1/2} \right\} \right] \\ & - \frac{4k^{3/2}b}{3r_p^{1/2}T_0^{3/2}} = 0 \dots\dots\dots (30) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (m - m^2 + n - n^2)^{1/2} - \left(\frac{1}{2} - n \right) \left[\ln \left\{ \left(\frac{1}{2} + \sqrt{m - m^2} \right) / \right. \right. \\ & \left. \left. \left(\frac{1}{2} - m \right) \right\} - \sin^{-1} \left\{ \left(\frac{1}{2} - n \right) / \left(\frac{1}{4} + m - m^2 \right)^{1/2} \right\} \right] \\ & + \sin^{-1} \left\{ \left(\frac{1}{2} \right) / \left(\frac{1}{4} + m - m^2 \right)^{1/2} \right\} = 0 \dots\dots\dots (31) \end{aligned}$$

式 (30), (31) を解けば m, n が得られ, 式 (19), (20) から t_{1p}, t_{2p} および t_p が得られる。

$r_{m,p}$ および q_p はそれぞれ, 式 (18), (21) ($p=2/3$) で与えられる。

(iii) $p=1/2$ の場合

$$\frac{T_1}{T_2} = \sqrt{2} + 1 \dots\dots\dots (32)$$

$$t_p = \sqrt{2} T_1 = (2 + \sqrt{2}) T_2 \dots\dots\dots (33)$$

T_1, T_2, t_p はそれぞれ, 式 (34), (35), (36) から求められる。

$$\frac{16(\sqrt{2}-1)}{3} m^3 - 2m^2 + \frac{k^2 b}{r_p T_0^2} = 0 \dots\dots\dots (34)$$

$$\frac{16(2\sqrt{2}+3)}{3} n^3 - 2(2\sqrt{2}+3)n^2 + \frac{k^2 b}{r_p T_0^2} = 0 \dots\dots\dots (35)$$

$$\frac{4(2-\sqrt{2})}{3} \left(\frac{t_p}{T_0}\right)^3 - \left(\frac{t_p}{T_0}\right)^2 + \frac{k^2 b}{r_p T_0^2} = 0 \dots\dots\dots (36)$$

$$r_{m,p} = r_p \left[1 - (2-\sqrt{2}) \frac{t_p}{T_0} \right] = \frac{2 r_p (T_0 - t_{2p})}{T_0} = r(t_{2p}) \dots\dots\dots (37)$$

q_p は式 (21) ($p=1/2$) で与えられる。

(iv) $p=1/3$ の場合

$$\frac{8}{5} m^5 + \left(3n - \frac{5}{2}\right) m^4 - (6n-1)m^3$$

$$+ (2n^3 - 3n^2 + 3n)m^2 - (2n^3 - 3n^2)m + \frac{3}{5} n^5 - \frac{3}{2} n^4 + n^3 - \frac{k^2 b}{r_p^2 T_0^3} = 0 \dots\dots\dots (38)$$

$$3m^4 - 2(4n+1)m^3 - 6(n^2-n)m^2 + 6n^2m - n^4 + 2n^3 = 0 \dots\dots\dots (39)$$

式 (38), (39) を解けば m, n が得られ, t_{1p}, t_{2p}, t_p が得られる。

$r_{m,p}$ および q_p はそれぞれ, 式 (18), (21) ($p=1/3$) で与えられる。

(3) 計算結果

a) t_p, T_1, T_2 と降雨・斜面パラメーターとの関係
上記の各式において, 洪水到達時間の無次元量 t_p/T_0 , $m (=T_1/T_0)$, $n (=T_2/T_0)$ は次の降雨波形・斜面地形要素よりなるパラメーター d のみの関数である。

$$d = \left(\frac{kb^p}{r_p^{1-p} T_0} \right)^{1/p} \dots\dots\dots (40)$$

この d に値を与え, $t_p/T_0, m, n, T_1/T_2$ を求めた結果を図-4 に示す。 d の増加とともに m, n は増大し, m は最大値 0.5 に近づく。 T_1/T_2 は $p=1, 1/2$ に対しては一定値をとり, $p=2/3, 1/3$ では d , あるいは m の増加とともにそれぞれ減少, 増大する。 p 値が 1 より小さくなるほど T_1/T_2 は 1 より大きくなって非線形効果が現われる。 Manning 式に対応する $p=0.6$ では数値計算によれば, $m=0, 0.2, 0.4, 0.49, 0.5$ に対して

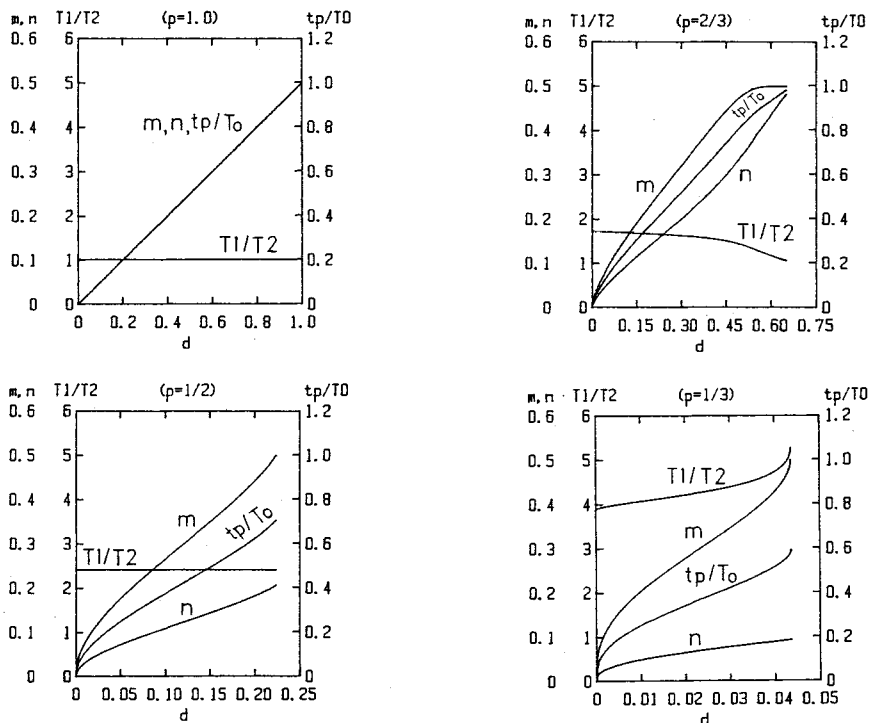


図-4 $t_p, T_1, T_2 \sim d$ の関係

それぞれ、 $d=0, 0.117, 0.306, 0.400, 0.423$; $T_1/T_2=1.94, 1.90, 1.80, 1.63, 1.54$ である。

b) t_p と $r_{m,p}$ の関係

2.(2)の各式から求めた t_p と $r_{m,p}$ をプロットしたものが図-5である。 $k^{1/p}b$ の各値についてはほぼ一直線に並ぶプロットが得られた。図中の直線は、 $r_{m,p}$ に等しい定常降雨強度に対する洪水到達時間、すなわち式(14)で $r_0=r_{m,p}$ のときの $t_{p,0}$ を示す。

このような $r_{m,p}$ と r_0 が等しいときの t_p と $t_{p,0}$ の差を e_t :

$$e_t = \frac{t_p - t_{p,0}}{t_{p,0}} \dots\dots\dots(41)$$

とすれば、式(18),(40)から e_t は次のように与えられる。

$$e_t = (1/d^p)(m+n)^p(m-m^2+n-n^2)^{1-p} - 1 \dots\dots(42)$$

m を与えれば、 n, d は2.(2)の式から決まるから、 e_t は m のみに関係する。 p の各値について $e_t \sim m$ 関係を図-6に示す。 m が0.3程度より小さければその差は数パーセント以下であるから、非定常降雨の t_p についても定常降雨に対する式(14)と同一の関係式(12)が近似的に成り立つ。

$$t_p \div \frac{kb^p}{r_{m,p}^{1-p}} \dots\dots\dots(43)$$

なお、洪水到達時間を慣用されている図-3の定義のようにとるときは、図-2では $t_p=2T_2$ となる。この t_p 時間内の平均降雨強度 $r_{m,p}$ をとり、 $t_p \sim r_{m,p}$ の関係をプロットすると、それらは図-5の直線よりかなり下の位置に並ぶ¹⁸⁾。すなわち、この定義による $t_p \sim r_{m,p}$ 関係は定常降雨の場合を近似し得ない。

c) ピーク流出量

ピーク流出量は式(21)で与えられるが、それが $r_{m,p}$ に等しい定常降雨強度 r_0 に対するピーク流出量、すなわち式(15)の $q_{p,0} (=r_0b)$ によってどの程度近似できるかを調べるために次の差をとる。

$$e_q = \frac{q_p - q_{p,0}}{q_{p,0}} \dots\dots\dots(44)$$

この e_q は式(41),(42)から

$$e_q = \left(\frac{t_p}{t_{p,0}}\right)^{1/p} - 1 = (1+e_t)^{1/p} - 1$$

$$= (1/d)(m+n)(m-m^2+n-n^2)^{1-p/p} - 1 \dots\dots(45)$$

図-7に示すように、 p が1より小さい値をとるほど e_q が増大する傾向は e_t に比べてかなり強い。 p の値が0.6程度よりも大きく、 m が小さい値であれば、 e_q は後述するような実用目的からは無視することが許される大きさとみなせよう。よって、この場合には、非定常降雨のピーク流出量 q_p についても定常降雨の場合の式

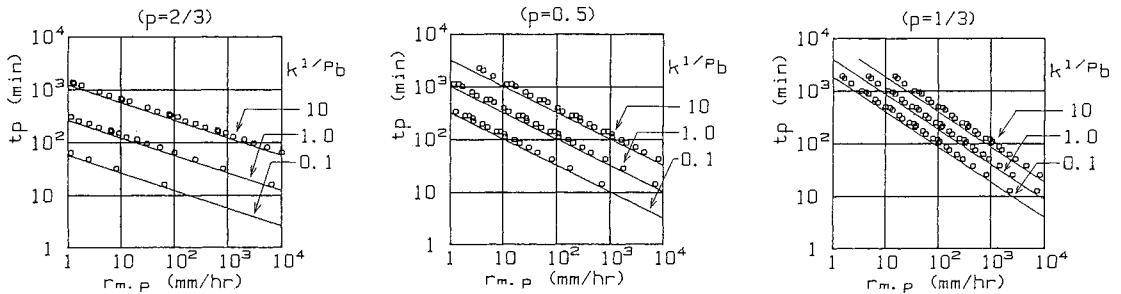


図-5 $t_p \sim r_{m,p}$ の関係

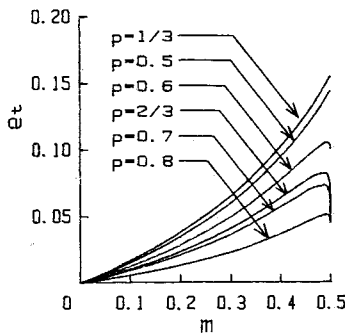


図-6 $e_t \sim m$ の関係

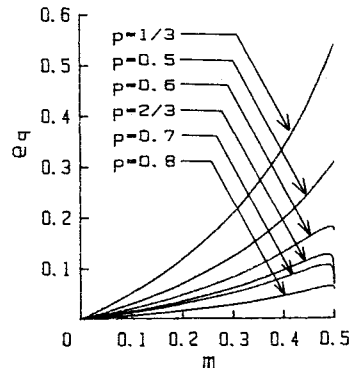


図-7 $e_q \sim m$ の関係

(15)と同じ関係(式(13))が近似的に成り立つ。

$$q_p \doteq r_{m,p} b \dots\dots\dots(46)$$

3. 洪水到達時間の推定法

上述のとおり、非定常降雨として対称な三角波形降雨を考えると、 $t_p \sim r_{m,p}$ 関係が定常降雨の場合の $t_{p,0} \sim r_0$ 関係にほぼ一致するので、前者の関係がわかればそれを後者の関係とみなすことができる。

そこで、観測ハイトグラフ・ハイドログラフから $t_p \sim r_{m,p}$ 関係を推定する方法を以下に述べる。

t_p は次式：

$$t_p = T_1 + T_2 = \left(\frac{T_1}{T_2} + 1\right) T_2 \dots\dots\dots(47)$$

で表わされるので、 T_1/T_2 が定数として与えられれば、 t_p は T_2 の定数倍として求めることができる。

T_1/T_2 は図-4のように、 $p=1, 1/2$ のときは一定値をとるが、それ以外の p 値では m の値に関係している。 $m \rightarrow 0$ に対する T_1/T_2 を $(T_1/T_2)_0$ 、また m の各値 ($m=0 \sim 0.5$) に対する T_1/T_2 の平均値を $(T_1/T_2)_{mean}$ とすれば、代表的な p 値に対するこれらの T_1/T_2 の値は表-1のとおりであり、これを図示したものが図-8である(なお、 $m=0.5$ に対する T_1/T_2 は $p=1/3, 0.4, 0.5, 0.6$ のとき、それぞれ5.27, 3.83, 2.41, 1.54であるが、 $p \geq 2/3$ では m が0.5にごく近くなると T_1/T_2 は急激に減少し、1に近づく)。

この T_1/T_2 値と式(47)をもとにした $t_p \sim r_{m,p}$ 関係の推定手順は次のとおりである。

表-1 T_1/T_2 の値

	p							
	1/3	0.4	0.5	0.6	2/3	0.7	0.8	1
$(T_1/T_2)_0$	3.85	3.16	2.41	1.94	1.70	1.60	1.35	1
$(T_1/T_2)_{mean}$	4.27	3.33	2.41	1.86	1.61	1.51	1.27	1

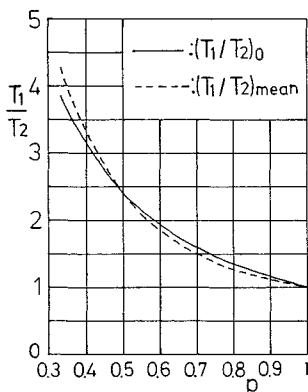


図-8 $T_1/T_2 \sim p$ の関係

i) 観測ハイトグラフとハイドログラフのピーク時間間隔 T_2 と平均降雨強度の推定値 $r_{m,p}$ ($=q_p/b$)の関係を対数紙上にプロットし、その回帰直線を引く。 T_2 は t_p の定数倍だから、この直線と式(43)を用いれば p の値が定まる ($T_2 \sim r_{m,p}$ の勾配は $t_p \sim r_{m,p}$ の勾配に等しい)。

ii) p の値に対する T_1/T_2 を図-8(あるいは表-1)から読み取る。

iii) T_1/T_2 と T_2 から、式(47)により t_p の推定値を求める。

iv) $r_{m,p}$ は本来 t_p 時間内の降雨量を平均して得られるが、観測ハイトグラフからの有効降雨波形の推定は一般に容易ではないので、そのときには式(46)を用いて $r_{m,p} = q_p/b$ として推定する。

v) t_p と $r_{m,p}$ の関係をプロットすれば、それが対象流域における洪水到達時間と平均降雨強度の関係を与える。また、それは定常降雨に対する関係 $t_{p,0} \sim r_0$ と近似的に一致する。

上述の方法で推定される $t_p \sim r_{m,p}$ 関係を、前記2.(2)の式より求めた $t_p \sim r_{m,p}$ 関係と比較した。 t_p を推定する際の T_1/T_2 の値は、パラメーター d に対する m の値が0.2以下であったので $(T_1/T_2)_0$ を用いた。図-9は両者を示したもので¹⁹⁾、 $t_p \sim r_{m,p}$ の計算値は厳密には一直線には乗らないので、その回帰直線を示してある。図のように、 $t_p \sim r_{m,p}$ 関係と $t_p \sim r_{m,p}$ 関係はほとんど一致する。

次に、 $t_p \sim r_{m,p}$ 関係を定常降雨の場合の関係式(14)と比べたものが図-10である。この図から、 $t_p \sim r_{m,p}$ 関係と $t_{p,0} \sim r_0$ 関係もほぼ一致するといえよう。

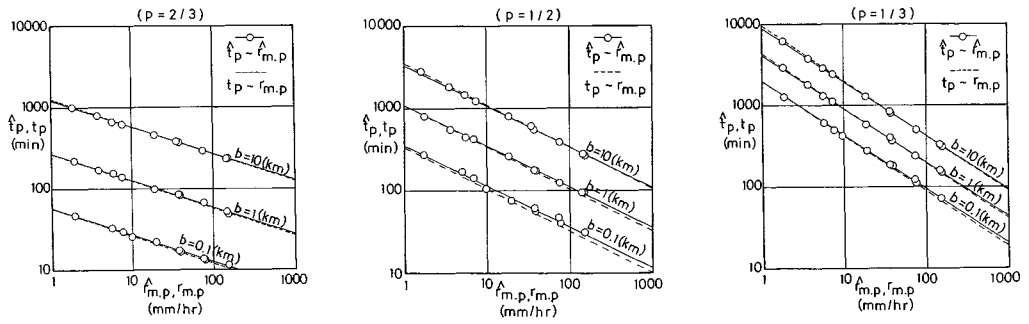
以上の結果から、三角波形ハイトグラフについて上述の方法で推定した $t_p \sim r_{m,p}$ 関係は、定常降雨に対する洪水到達時間-降雨強度関係を実用上十分の精度で近似し得るといえる。

4. 洪水到達時間推定法の実河川流域への適用

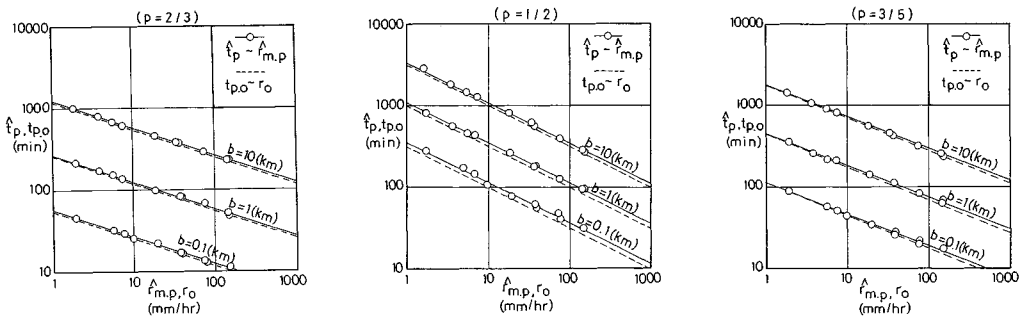
(1) 資料の選定と $t_p, r_{m,p}$ の求め方

実流域での観測資料に上述の洪水到達時間推定法を適用した。本推定法は河道における伝播時間を考慮していないので実流域への適用には限度があることは確かであるが、以下の流域ではその河道効果が無視できると仮定して適用を行った。対象流域は、那賀川流域(折宇谷試験流域)、筑波山麓の山口川流域、大井川水系の笹間川流域、多摩川水系の別所流域、南大沢流域、大栗川流域、車橋流域の7流域であり、その地形図を図-11(1)~(7)に示す^{20)~25)}。車橋流域以外の6流域は山林地流域、車橋流域は都市化流域である。

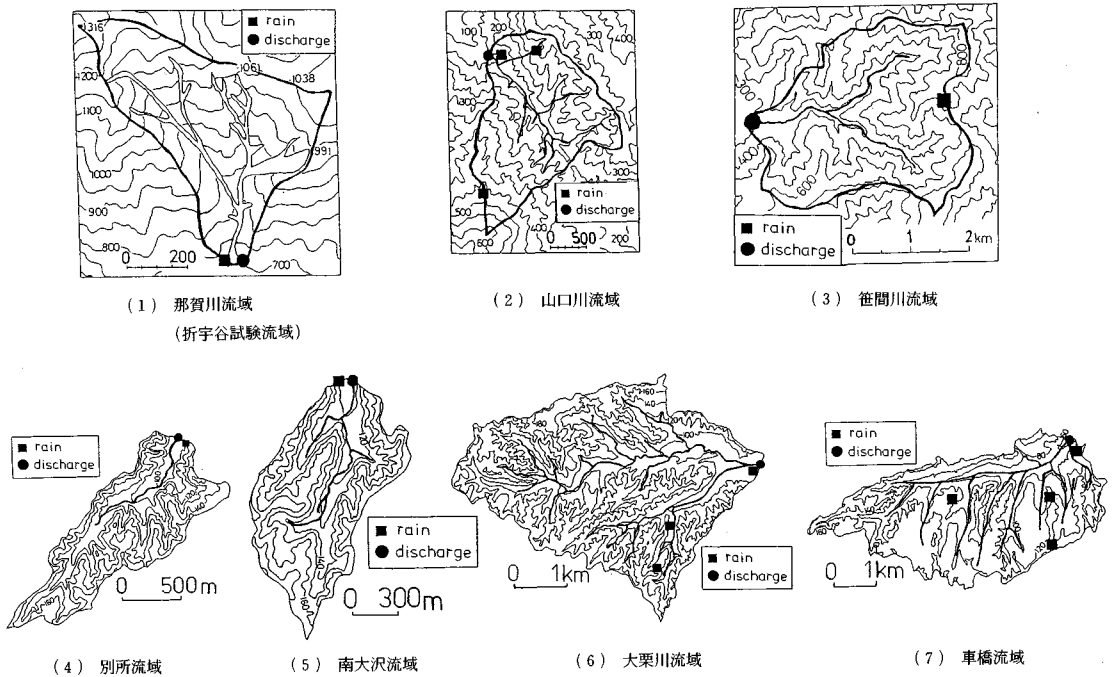
本推定法は表面流が卓越する洪水流出を対象としてい



図—9 $t_p \sim r_{m,p}$, $\hat{t}_p \sim \hat{r}_{m,p}$ の関係



図—10 $t_{p,o} \sim r_o$, $\hat{t}_p \sim \hat{r}_{m,p}$ の関係



図—11 流域地形図

るので、次のような基準によって解析資料を選定した。すなわち、降雨強度およびピーク流出量が大きく、降雨継続時間が推定せんとする洪水到達時間よりも長いこと、かつ観測ハイエトグラフに移動平均を施したとき三角形に近い降雨波形とみなすことのできる資料を採用した。

これらの資料について、洪水到達時間 t_p は観測ハイエトグラフとヒドログラフのピーク時間間隔 T_2 を用いて前述のように推定する。ピーク流出量 Q_p は水平分離法を用いた直接流出量から求め、この Q_p から平均有効降雨強度を $r_{m,p} = Q_p/A$ (A ：流域面積) として推定した。

(2) 実流域への適用結果

各流域について $t_p \sim r_{m,p}$ の関係をプロットしたものが図—12 (1)~(4) である^{26), 27)}。ピーク時間間隔 T_2 を求める際、降雨量観測の時間単位が那賀川流域 (1時間雨量) 以外では10分間雨量で変動が激しいので、観測ハイエトグラフに移動平均を施したうえでピーク降雨強度の時刻を定めた。図にみられるとおり、 t_p と $r_{m,p}$ の間には有意な相関関係があり、プロットした点に対する回帰直線を引くことができる。この回帰直線を次式で表わす。

$$t_p = U \frac{kb^p}{r_{m,p}^{1-p}} \dots \dots \dots (48)$$

ここに、 U は t_p を分、 b を km、 $r_{m,p}$ を mm/h、 k を

$m^{1-2p} \cdot s^p$ の単位にとるとき定数で、

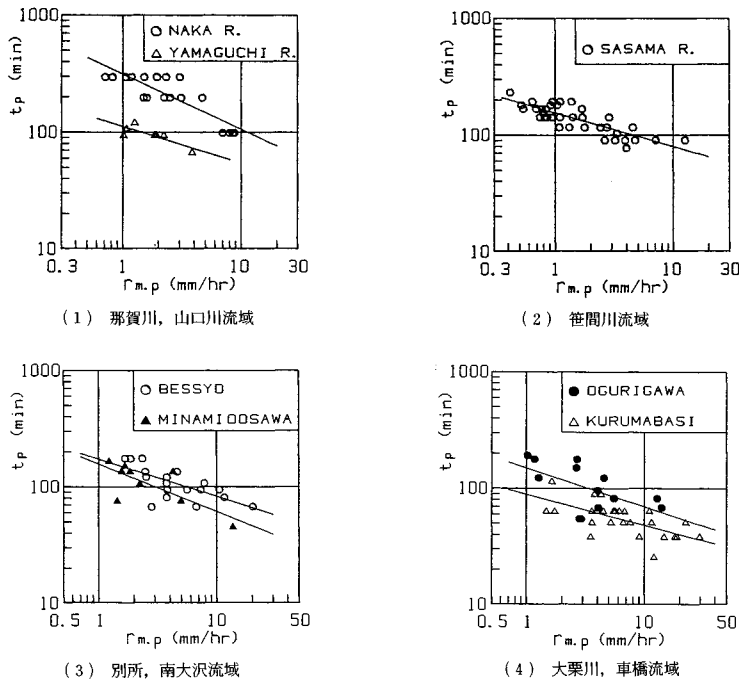
$$U = 6 \times 10^{(4-3p)/3.6^p}$$

Manning 型の抵抗則を用いれば、式 (48) の k は

$$k = (N/\sqrt{\sin \theta})^p \dots \dots \dots (49)$$

式 (49) における p の値は回帰直線の勾配から決まるから、 b 、 θ を与えれば式 (48)、(49) からそれぞれ k 、 N の値が求められる。

各流域について斜面長 b および斜面勾配 θ は次のようにとる。那賀川流域では主河道の方向にほぼ沿って斜面が傾いているので、主河道の勾配および主河道長をそのまま斜面勾配、斜面長とした。山口川流域、笹間川流域では斜面は主河道に直交する方向に大きな勾配をもっているため、その直交方向の平均斜面勾配および平均斜面長をとった。多摩丘陵地では主河道に対してかなり大きな角度をもって谷が形成されているため、主河道に直交する方向の斜面と支川に直交する方向の斜面の両者を考える必要がある。別所流域については河道は主河道一本であるので、その河道に直交する方向または斜面に沿って斜面勾配と斜面長をとり、南大沢流域、大栗川流域では支川に直交する方向へも斜面勾配と斜面長をとる。車橋流域は開発の結果、谷に向かって傾いている斜面が少なくなっているため、主河道に直交する方向に斜面勾配と斜面長をとった。このように各流域に含まれる1つ、あるいは複数の斜面について長さとお勾配を求め、それらを平均してその流域の平均斜面長 b 、平均斜面勾



図—12 $t_p \sim r_{m,p}$ の関係

表—2 斜面流定数

流域名	k	p ₀	N ₀	p _M	N _M	A (km ²)	b (km)	θ (°)
那賀川	0.42	0.53	0.15	0.6	0.17	0.25	0.90	30.5
山口川	0.60	0.69	0.25	0.6	0.22	3.12	0.80	15.0
笹間川	1.00	0.71	0.58	0.6	0.58	9.16	0.82	20.2
別所	1.31	0.68	0.47	0.6	0.49	1.123	0.43	5.7
南大沢	0.67	0.59	0.19	0.6	0.19	0.968	0.30	8.1
大栗川	0.86	0.67	0.21	0.6	0.21	14.05	0.57	4.1
車橋	0.42	0.74	0.06	0.6	0.05	13.47	1.63	2.1

配θとした。

これらの b , θ を用いて式 (48), (49) の k , p , N を求めた結果が表—2 の k , p_0 , N_0 である。 p_0 の値は 0.53~0.74 の範囲で流域により異なっているが、図—12 に示すとおり資料数の多少も関係するので有意な差であるかどうかは判断できない。7 流域の p_0 の平均値は 0.66 で、Manning 式の 0.6 よりやや大きい。各流域の流出特性はむしろ N_0 の値に現われているとみられるので、それらを比較するために p の値は全流域について Manning 式の値: $p_M=0.6$ として N の値を求めたものが表—2 の N_M である。

多摩川水系の 4 流域のうち、まず別所流域と南大沢流域は流域面積がほぼ等しいが、図—12 (3) に示すように南大沢流域の方が洪水到達時間が短い。これは斜面長が短く、 N_M 値が小さいことと対応している。南大沢流域と、流域面積がその約 15 倍である大栗川流域の洪水到達時間はそれほど違わない。これは斜面長の比では 2 倍程度であることから説明できそうである。また、大栗川流域は南大沢流域を含む流域であり、両流域の N_M はほぼ等しい値が得られている。また、別所流域が大栗川流域の洪水到達時間をむしろ上まわるのは斜面長の差が少ないことに加えて、別所流域の N_M 値が大きいことによると考えられる。大栗川、南大沢流域は山林地以外に荒地の割合が多いが、別所流域は山林地、水田の割合が多く、荒地が少ない。これらの地形、地被状態を k , N 値が反映していると考えられる。自然流域であるこれら 3 流域に比べて、都市化が進んだ車橋流域は流域面積が大栗川とほぼ同じであるにもかかわらず洪水到達時間はかなり短い。 N_M 値は他の流域に比べてきわめて小さく、これは流域の都市化に対応していると思われる。

次に山口川流域と笹間川流域を比較すると、笹間川流域の方が洪水到達時間が長い。これは斜面長、斜面勾配はほぼ等しいが、 N_M の値が笹間川流域の方が大きいためであると考えられる。流域面積が最も小さい那賀川流域の洪水到達時間が他の流域よりも長いのは、斜面長が大きいことに強く関係していると考えられる。

図—12, 表—2 によれば、洪水到達時間と流域面積の間にはほとんど関連性は認められない。これに対して、上述のように流域を平均的な斜面で代表させ、その斜面

の諸量 (b , θ , N) と雨水の伝播特性を洪水到達時間と対比させることによって、各流域の洪水到達時間の長短がかなりうまく説明できたと思われる。

5. 結 論

本研究では非定常降雨に対する洪水到達時間の基本的性質を理論的に導出し、その結果に基づく洪水到達時間推定法を提示し、またその適用性を検証した。本研究で得られた結果を要約すると次のようである。

(1) 単一斜面における洪水到達時間を雨水擾乱の伝播過程に基づいて定義し、降雨強度が三角波形をなす場合にその洪水到達時間を降雨波形パラメーター r_p , T_0 , 斜面長 b , 斜面流パラメーター k , p の関数として与える式を示した。

(2) 洪水到達時間とその時間内の平均降雨強度の関係は、定常降雨に対する洪水到達時間と降雨強度の関係にほとんど一致する。また、ピーク流出量については、非定常降雨と定常降雨の場合の差は洪水到達時間に比べて大きい。実用上はその差は無視できる場合が多いと考えられる。

(3) 洪水到達時間をハイトグラフとハイドログラフのピーク時間間隔の定数倍として表わし、その定数を p の各値に対して示した。

(4) 以上の結果をもとに、三角波形をなすハイトグラフとそのハイドログラフから洪水到達時間と平均降雨強度の関係を推定する方法を提示した。推定精度は十分なものであり、また推定された両者の関係は定常降雨に対する洪水到達時間と降雨強度の関係とほぼ一致することが確かめられた。

(5) この推定法を実流域での観測資料に適用した結果、プロットされた洪水到達時間と平均降雨強度は有意な相関関係を示した。また、その回帰直線から求められた斜面の等価粗度および斜面長と洪水到達時間との対応関係は、各流域の洪水流出特性を定性的にはかなり適切に説明していると思われる。

以上のように、洪水到達時間の推定においてこれまで定量的には不明確であった降雨の非定常効果が、本研究で理論的基礎をもって定量評価できたことは有意義であると考えられる。また、本研究で対象としたような比較的小さい流域では、洪水到達時間に関与する地形量としては流域面積や主河道長・勾配よりも流域を構成する斜面の地形要素、すなわち斜面長、斜面勾配、粗度係数等を用いる方が妥当であると思われる。

本推定法をより一般的に実流域への適用に役立てるには、本研究では無視した流域の河道効果や二等辺三角形以外の降雨波形の影響などについて検討する必要があるが、それらに関しては今後の課題としたい。

終わりに、本研究においては下記文献21)~24)により貴重な水文観測資料を利用させて頂いたことを記し、徳島県、建設省土木研究所、(財)電力中央研究所、および関係各位に深謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 木下武雄：都市化による流出の変化，土木技術資料，9-9，1967.
- 2) Stephenson, D. and Meadows, M. E. : Kinematic Hydrology and Modelling, Developments in Water Science, 26, Elsevier, 1986.
- 3) 角屋 睦：都市化に伴う流出の変化，土木学会論文集，第363号/Ⅱ-4，1985.
- 4) 石原藤次郎・高埴琢馬：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，第60号・別冊3-3，1959.
- 5) Sueishi, T. : Run-off estimation in storm sewer system using equivalent roughness, Trans. JSCE, No.91, 1963.
- 6), 7), 8) Wooding, R. A. : A hydraulic model for the catchment-stream problem, (I), (II), (III), J. Hydrology, Vol.3, Vol.4, 1965-1966.
- 9) Shaake, J. C. Jr., Geyer, J. C. and Knapp, J. W. : Experimental examination of the rational method, Proc. ASCE, Vol.93, No. HY 6, 1967.
- 10) 吉野文雄：合理式による洪水流量の算定についての提案，第27回建設省技術研究会，1973.
- 11) 角屋 睦・福島 晟：中小河川の洪水到達時間，京大防災研究所年報，第19号，B，1976.
- 12) 昭和60年版水理公式集，土木学会，1985.
- 13) 吉野文雄・吉谷純一・堀内輝亮：都市流出モデルのパラメータ標準化と評価，第29回水理講演会論文集，1985.
- 14) 佐藤一夫・和泉 清：都市中小河川の流域規模と洪水到達時間，第30回水理講演会論文集，1986.
- 15) 神田 徹・前田徹哉：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.
- 16) 友杉邦雄・石原安雄：降雨分布特性が出水波形特性に及ぼす効果—要素的直接流出場の水理モデルの解析解による検討—，京大防災研究所年報，第29号，B-2，1986.
- 17) 星 清・村上泰啓：小流域における総合貯留関数法の開発，第31回水理講演会論文集，1987.
- 18) 神田 徹・神吉和夫・田中俊行：合理式の洪水到達時間について，水文・水資源学会1989年研究発表会要旨集，1989.
- 19) 神田 徹・元木沢知紀・前田徹哉：非定常降雨波形に対する洪水到達時間の推定，土木学会第41回年次学術講演会，1986.
- 20) 端野道夫：山地小試験流域の降雨流出解析，第26回水理講演会論文集，1982.
- 21) 徳島県：重要水源山地整備治山事業調査報告書（昭和54~60年度）.
- 22) 建設省土木研究所：裏筑波試験地水文観測資料（昭和44年~52年），1978.
- 23) 建設省土木研究所：多摩ニュータウン試験地水文観測資料（その1~その3），1985.
- 24) (財)電力中央研究所：笹間川試験流域水文観測資料，1988.
- 25) 志子田典生・友納寛幸・虫明功臣・柳原和憲・八尋康雄：多摩ニュータウン流出試験地における流出特性と都市化によるその変化，第29回水理講演会論文集，1985.
- 26) 神田 徹・吉岡泰邦・元木沢知紀：洪水到達時間の一推定法，土木学会関西支部年次学術講演会，1987.
- 27) 神田 徹・神吉和夫・元木沢知紀・吉岡泰邦：洪水到達時間の一推定法（続），土木学会関西支部年次学術講演会，1988.

(1989.3.9・受付)