

ハイエト グラフと その特性に関する研究*

STUDIES ON THE HYETOGRAPH AND ITS CHARACTERISTICS

石 黒 政 儀**

By Masayoshi Ishiguro

1. 緒 言

河川洪水流量算定や都市下水道計画での雨水流出量算定を初めとする各種排水計画において基本的に考慮すべきものとして降雨特性があり、その計画降雨としての降雨強度、降雨型をどのように探るかは重要な問題の一つである。そのために古くより降雨特性に関する多くの研究がなされ、それぞれの手法で実際の計画設計に用いられてきている。しかるに降雨強度の算定法に関しては、近年まで流出量推定として広く用いられているラショナル法への適用を主目的として研究論議がなされてきたといえる^{1), 2)}。すなわち、排水区域における最遠点から考慮地点までの雨水流達時間や洪水の到達時間に等しい降雨継続時間中の最大雨量を過去の観測資料から発生頻度と組み合わせて確率降雨強度式を算出し、それより任意の確率年をもった最大流量を推定しようとするものである。

近年、水文学の研究発展によって、ラショナル法を初めとする既往の流出量算定諸法がもつ欠陥や不備、不足の諸点が指摘、解明され、それらに代る新しい水文学的、水理学的な各種流出解析法が提唱、実用化されつつある。また下水道計画を初めとする各種排水工においては従来のピーク流量算定とは別に、強雨時の下水希釈、雨水放流量、雨水沈殿池、滞水池あるいは各種の貯水池容量、湛水量、内水排除などの計画設計において流出量の時間的变化すなわちハイドロ グラフを必要とすることが非常に多くなってきた^{3), 4)}。

これらの諸要求に対応する降雨特性の表現としては従来の降雨強度曲線のみでは十分でなく、これに代るものとして、降雨が降り始めて時間の経過とともに最強雨部を過ぎて降り止む、という実際の降雨現象を表現する連続降雨型曲線、すなわちハイエト グラフの概念を導入、解明し数式化することによって流出解析での降雨特性に関する諸問題の一つを解決することができる。

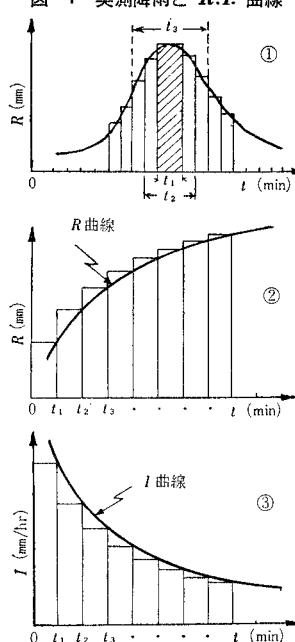
本文では従来、研究実用されている降雨強度曲線の意義と、その適用範囲を明らかにし、上田政義⁵⁾、Keifer &

Chu^{6), 7)}によるハイエト グラフの概念を、さらに発展せしめて、各種の式型に応ずる算定法とその特性を明らかにし、下水道計画などに用いる、いわゆる短時間強雨を対象とした確率降雨強度曲線からハイエト グラフ式を算定する方法と、その実例を示し、基本降雨強度式型に基づいた各種ハイエト グラフからの任意時間中の降雨強度および降雨量算定法をも提示する。ついで河川洪水流量のように流域面積が大きく日雨量を考慮せねばならない場合に、わが国で広く用いられている物部長穂式⁸⁾、伊藤剛式⁹⁾、川上謙太郎式¹⁰⁾などの性格をも明らかにして、日雨量単位でのハイエト グラフ算定法を新たに提唱し、近年わが国で発生した豪雨災害時の降雨記録を用いた解析実例を示し、ハイエト グラフによる計画降雨の取り扱いをも論議、提唱する。

2. 降雨強度曲線とその特性

降雨強度曲線（式）は従来の河川洪水流量算定や排水計画での雨水流出量算定などで、ピーク流量を求めるための一方法であるラショナル法への適用を主目的として

図-1 実測降雨と R.I. 曲線



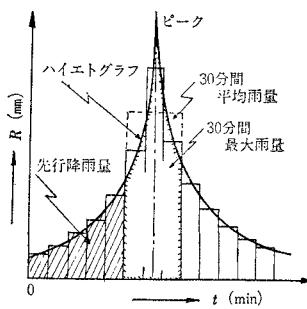
組成されたものである。すなわち、排水区域の最遠点から考慮地点に雨水が流達する t 時間中の平均強度を得るために、任意の t 時間に応する降雨強度を容易に算出できるように、各継続時間に対する多くの降雨資料を水文統計的に解析して、最適の式型で表現したものである。これらの関係を短時間降雨を例として模擬化すれば図-1 のようになる。すなわち図-1において

① は降雨が降り

* 土木学会第 18 回（昭.38.5）、第 19 回（昭.39.5）、第 22 回（昭.42.5）年次学術講演会において一部発表

** 正会員 工博 宮崎大学教授 工学部土木工学科

図-3 一連降雨の特性



で表わす。ところで実際の降雨変動は複雑であるが、式型の簡略化のために、ピーク前の強度を $i_b = f(t_b)$ 、ピーク後の強度を $i_a = f(t_a)$ とし、2つに分離して表現する。この i_b 、 i_a の両式が求められる。

ば、流出現象に最も重要な影響を与えるつぎの3項目に対する数値が容易に得られる。

(1) 降雨継続期間中における任意期間中の最大雨量(降雨強度)とその発生頻度(確率)。

(2) 一連降雨中における最強雨部(ピーク)の発生位置。

(3) 任意雨量強度、任意期間以前における降雨量、すなわち先行降雨量。

ハイエトグラフのこのような関係は図-3のように示される。

ハイエトグラフ算定式の誘導

まず問題を簡略化するために図-4のようにピークが最初にあり、時間の経過とともに強度が弱まる場合を考える。図-4では

10分ごとの降雨量がとてあり、これから降雨強度曲線 I を求めると図-5の実線となり、降雨量曲線 R は鎖線となる。また連続降雨曲線 i は図-4の

図-4

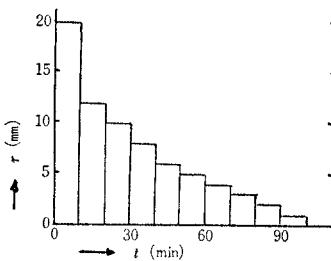
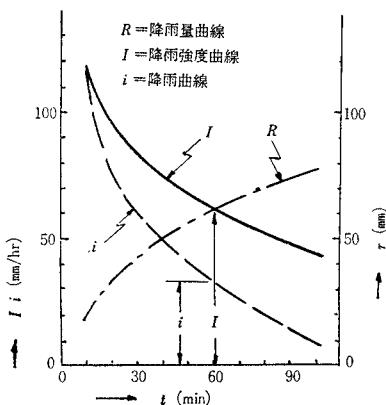


図-5



10分ごと降雨量をそれぞれ時間単位の強度にとれば、図中の破線で示され、これらの値は表-1のように算出される。

表-1

$t(\text{min})$	r	R	$\frac{60}{t}$	I	i
10	20	20	6.00	120	120
20	12	32	3.00	96	72
30	10	42	2.00	84	60
40	8	50	1.50	75	48
50	6	56	1.20	67.2	36
60	5	61	1.00	61.0	30
70	4	65	0.86	55.7	24
80	3	68	0.75	51.0	18
90	2	70	0.67	46.7	12
100	1	71	0.60	42.6	6

10分ごと降雨量をそれぞれ時間単位の強度にとれば、図中の破線で示され、これらの値は表-1のように算出される。

I曲線式として前述の式(2)をとり、式(1)を変形すれば次式となる。

$$R = I \cdot t / 60 \quad \dots \dots \dots (12)$$

式(2)に対する R は次式で示される。

$$R = \left(\frac{a}{\sqrt{t} \pm b} \right) \cdot \left(\frac{t}{60} \right) \quad \dots \dots \dots (13)$$

さらに図-5の I と i 両曲線の関係から、 I から求めた R と i 曲線下の全面積から求めた R とは等しくなければならない、すなわち

$$R = \frac{1}{60} \int_0^t i dt \quad \dots \dots \dots (14)$$

式(14)を微分すれば

$$dR/dt = i/60 \quad \dots \dots \dots (15)$$

式(13)を微分すると

$$dR/dt = \frac{a}{60} \frac{[(1-0.5)t^{0.5} \pm b]}{[t^{0.5} \pm b]^2} \quad \dots \dots \dots (16)$$

前述の理由によって式(15)と式(16)は等しいので

$$i = \frac{a[0.5\sqrt{t} \pm b]}{[\sqrt{t} \pm b]^2} \quad \dots \dots \dots (17)$$

を得る。これが図-4、図-5のピークが最初にある場合のハイエトグラフ式である。

他の降雨強度式型、式(3)、式(4)も同様につぎのように誘導される。

Case 2、式(3)の Sherman 型の場合；

$$R = \left(\frac{a}{t^n} \right) \left(\frac{t}{60} \right) \quad \dots \dots \dots (18)$$

$$dR/dt = \frac{a}{60} \frac{[(1-n)t^n]}{[t^n]^2} \quad \dots \dots \dots (19)$$

式(15)、式(19)より次式を得る。

$$i = \frac{a(1-n)}{t^n} \quad \dots \dots \dots (20)$$

Case 3、式(4)の Talbot 型の場合

$$R = \left(\frac{a}{t+b} \right) \left(\frac{t}{60} \right) \quad \dots \dots \dots (21)$$

$$dR/dt = \frac{a}{60} \left[\frac{b}{(t+b)^2} \right] \quad \dots \dots \dots (22)$$

式(15)、式(22)より次式を得る。

* 以後、混同をさけるために、前述の降雨強度曲線(式)を I 、ハイエトグラフの連続降雨曲線(式)を i で表わす。

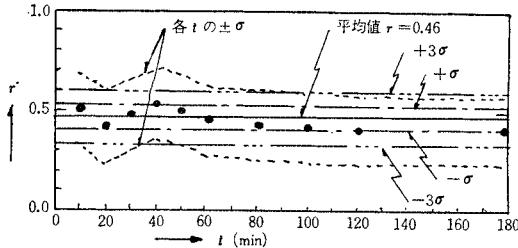
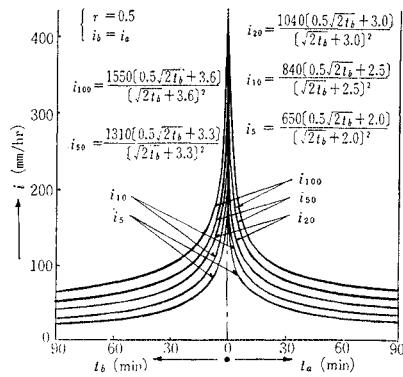
図-7 鹿児島市の r 

図-8 M市確率ハイエトグラフ



それ検討決定すべきであるが、降雨資料の入手できない場合は、このように $r=0.5$ として取り扱えばハイエトグラフの算定は非常に迅速、簡略化される。

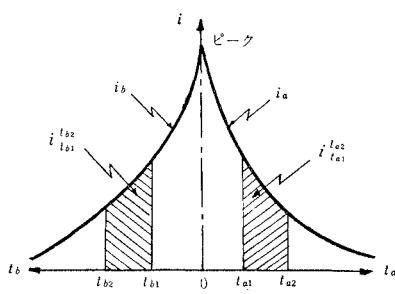
M市確率年別ハイエトグラフ i_b, i_a を図-2の確率年別降雨強度式 I_N から $r=0.5$ として求めたものが図-8である。

4. ハイエトグラフ任意時間中の降雨量算出法

単位図法、総合単位図法、特性曲線法、等価粗度係数法など最近の流出解析法^{16), 17), 18)}では降り始めから降り終りまでの単位時間ごとの降雨量が要求される。そこで前述のようにして求められたハイエトグラフから任意時間中の降雨量算出の計算式を誘導する。

図-9において $t_{b2} > t_{b1}, t_{a2} > t_{a1}$ とし i_b, i_a について積分すれば、この時間内の降雨強度 $i(\text{mm}/\text{hr})$ が得られ、この i から降雨量 $R(\text{mm})$ も求められる。

図-9



(1) Case 1 の式型の場合

式(26)の i_b で $+b$ の場合をまず誘導すると

$$i_b = \frac{a(0.5\sqrt{t_b/r}+b)}{(\sqrt{t_b/r}+b)^2} \quad \dots\dots\dots(35)$$

$$\int_{t_{b1}}^{t_{b2}} i_b dt_b = \int_{t_{b1}}^{t_{b2}} \frac{a(0.5\sqrt{t_b/r}+b)}{(\sqrt{t_b/r}+b)^2} dt_b \quad \dots\dots\dots(36)$$

式(36)の積分のため定数 a を保留し、式(35)の右辺を部分分数に分解する。

$$\begin{aligned} \frac{0.5\sqrt{t_b/r}+b}{(\sqrt{t_b/r}+b)^2} &= \frac{0.5(\sqrt{t_b/r}+b)+0.5b}{(\sqrt{t_b/r}+b)^2} \\ &= \frac{0.5}{(\sqrt{t_b/r}+b)} + \frac{0.5b}{(\sqrt{t_b/r}+b)^2} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(37)$$

式(37) 第1項の積分

ここで、 $\sqrt{t_b}=x$ とおくと $t_b=x^2, dt_b=2x \cdot dx$

$$\begin{aligned} \int_{t_{b1}}^{t_{b2}} \frac{0.5 dt_b}{\sqrt{t_b/r}+b} &= 0.5 \int_{\sqrt{t_{b1}}}^{\sqrt{t_{b2}}} \frac{2x \cdot dx}{\sqrt{t_b}(x/\sqrt{r})+b} \\ &= 0.5 \int_{\sqrt{t_{b1}}}^{\sqrt{t_{b2}}} \frac{2\sqrt{r} \cdot x \cdot dx}{x+b\sqrt{r}} \\ &= 0.5 \int_{\sqrt{t_{b1}}}^{\sqrt{t_{b2}}} 2\sqrt{r} dx - 0.5 \cdot 2 \cdot b \cdot r \int_{\sqrt{t_{b1}}}^{\sqrt{t_{b2}}} \frac{dx}{x+b\sqrt{r}} \\ &= \sqrt{r}[x] \frac{\sqrt{t_{b2}}}{\sqrt{t_{b1}}} - b \cdot r [\log(x+b\sqrt{r})] \frac{\sqrt{t_{b2}}}{\sqrt{t_{b1}}} \\ &= \sqrt{r}(\sqrt{t_{b2}} - \sqrt{t_{b1}}) - b \cdot r \cdot \log \frac{\sqrt{t_{b2}}+b\sqrt{r}}{\sqrt{t_{b1}}+b\sqrt{r}} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(38)$$

式(37) 右辺第2項の積分

第1項と同じく $\sqrt{t_b}=x$ とおくと $dt_b=2x \cdot dx$

$$\begin{aligned} \int_{t_{b1}}^{t_{b2}} \frac{0.5b}{(\sqrt{t_b/r}+b)^2} dt_b &= 0.5 \cdot b \int_{\sqrt{t_{b1}}}^{\sqrt{t_{b2}}} \frac{2x \cdot dx}{\sqrt{t_b} \{(x/\sqrt{r})+b\}^2} \\ &= 0.5b \int_{\sqrt{t_{b1}}}^{\sqrt{t_{b2}}} \frac{2r(x+b\sqrt{r})-2b \cdot r \cdot \sqrt{r}}{(x+b\sqrt{r})^2} dx \\ &= rb \int_{\sqrt{t_{b1}}}^{\sqrt{t_{b2}}} \frac{dx}{(x+b\sqrt{r})} - b^2 \cdot r \cdot \sqrt{r} \int_{\sqrt{t_{b1}}}^{\sqrt{t_{b2}}} \frac{1}{(x+b\sqrt{r})^2} dx \\ &= rb[\log(x+b\sqrt{r})] \frac{\sqrt{t_{b2}}}{\sqrt{t_{b1}}} \\ &\quad + b^2r\sqrt{r} \left[\frac{1}{(x+b\sqrt{r})} \right] \frac{\sqrt{t_{b2}}}{\sqrt{t_{b1}}} \\ &= rb \log \frac{\sqrt{t_{b2}}+b\sqrt{r}}{\sqrt{t_{b1}}+b\sqrt{r}} + b^2r\sqrt{r} \\ &\quad \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{t_{b2}}+b\sqrt{r}} - \frac{1}{\sqrt{t_{b1}}+b\sqrt{r}} \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(39)$$

ゆえに式(36)は定数 a 、式(38)と式(39)より次式となる。

$$\begin{aligned} i_{t_{b1}}^{t_{b2}} &= a \left[\left\{ \sqrt{r}(\sqrt{t_{b2}} - \sqrt{t_{b1}}) - b \cdot r \log \frac{\sqrt{t_{b2}}+b\sqrt{r}}{\sqrt{t_{b1}}+b\sqrt{r}} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + rb \left\{ \log \frac{\sqrt{t_{b2}}+b\sqrt{r}}{\sqrt{t_{b1}}+b\sqrt{r}} - b^2r\sqrt{r} \left(\frac{1}{\sqrt{t_{b2}}+b\sqrt{r}} - \frac{1}{\sqrt{t_{b1}}+b\sqrt{r}} \right) \right\} \right] \\ &= a\sqrt{r} \left\{ (\sqrt{t_{b2}} - \sqrt{t_{b1}}) + rb^2 \right. \\ &\quad \left. \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{t_{b2}}+b\sqrt{r}} - \frac{1}{\sqrt{t_{b1}}+b\sqrt{r}} \right) \right\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(40)$$

同様に式(27)の i_a も積分値として次式を得る。

$$\begin{aligned} i_{ta_1}^{t_{a_2}} &= a\sqrt{1-r} \left\{ (\sqrt{t_{a_2}} - \sqrt{t_{a_1}}) + (1-r)b^2 \right. \\ &\quad \left. \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{t_{a_2}} + b\sqrt{1-r}} - \frac{1}{\sqrt{t_{a_1}} + b\sqrt{1-r}} \right) \right\} \dots (41) \end{aligned}$$

さらに式(26), 式(27)で $-b$ の場合は, 式(40), 式(41)での $+b$ の記号が $-b$ になるのみである。

(2) Case 2 の式型の場合

式(28)の i_a の積分, ただし $t_{b_2} > t_{b_1}$ とする。

$$\begin{aligned} \int_{t_{b_1}}^{t_{b_2}} i_b dt_b &= \int_{t_{b_1}}^{t_{b_2}} \frac{a(1-r)}{(t_b/r)^n} dt_b \\ &= a \left[(1-r)r^n \frac{-t_b^{-(n-1)}}{(n-1)} \right]_{t_{b_1}}^{t_{b_2}} = [ar^n t_b^{-n+1}]_{t_{b_1}}^{t_{b_2}} \\ i_{t_{b_1}}^{t_{b_2}} &= ar^n (t_{b_2}^{1-n} - t_{b_1}^{1-n}) \\ &= ar^n \left(\frac{1}{t_{b_2}^{n-1}} - \frac{1}{t_{b_1}^{n-1}} \right) \end{aligned} \quad \left. \right\} \dots \dots \dots (42)$$

式(29) i_a の積分も同様にして次式を得る。

$$\begin{aligned} i_{ta_1}^{t_{a_2}} &= a(1-r)^n \cdot (t_{a_2}^{1-n} - t_{a_1}^{1-n}) \\ &= a(1-r)^n \cdot \left(\frac{1}{t_{a_2}^{n-1}} - \frac{1}{t_{a_1}^{n-1}} \right) \end{aligned} \quad \left. \right\} \dots \dots \dots (43)$$

(3) Case 3 の式型の場合

式(30) i_b の積分, 式(30)の分母 $(t_b/r) + b = T_b$ とおくと $dt_b = r dT_b$ となり, 次式に変形して

$$i_b = a \cdot b \cdot (T_b)^2 \quad \dots \dots \dots (44)$$

これを $t_{b_2} > t_b > t_{b_1}$ で積分すると,

$$\begin{aligned} i_{t_{b_1}}^{t_{b_2}} &= \int_{t_{b_1}}^{t_{b_2}} i_b dt_b = \int_{t_{b_1}}^{t_{b_2}} \{ab/(T_b)^2\} r \cdot dT_b \\ &= \left[-\frac{abr}{T_b} \right]_{t_{b_1}}^{t_{b_2}} \end{aligned}$$

ただし, $t_{b_2}' = (t_{b_2}/r) + b$, $t_{b_1}' = (t_{b_1}/r) + b$

ゆえに

$$\begin{aligned} i_{t_{b_1}}^{t_{b_2}} &= \left[-\frac{abr}{(t_{b_2}/r) + b} \right]_{t_{b_1}}^{t_{b_2}} \\ &= abr \left(\left(\frac{1}{t_{b_1}'} + b \right) - \left(\frac{1}{t_{b_2}'} + b \right) \right) \end{aligned} \quad \left. \right\} \dots \dots \dots (45)$$

または, $= a \cdot b \cdot r^2 \left\{ \frac{1}{t_{b_1} + br} - \frac{1}{t_{b_2} + br} \right\}$

式(31)の i_a の積分も同様にして次式を得る。

$$\begin{aligned} i_{ta_1}^{t_{a_2}} &= ab(1-r) \left[\left\{ 1/\left(\frac{t_{a_1}}{1-r} + b\right) \right\} - \left\{ 1/\left(\frac{t_{a_2}}{1-r} + b\right) \right\} \right] \\ &= ab(1-r)^2 \left[\left\{ \frac{1}{t_{a_1} + b(1-r)} \right\} - \left\{ \frac{1}{t_{a_2} + b(1-r)} \right\} \right] \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (46)$$

以上の式(40), (41), (42), (43), (45), (46)によつて, それぞれの基本式型にしたがつたハイエト グラフからの任意時間中の降雨強度が得られる。そして降雨量を求めるには i が時間単位の強度 (mm/hr) であれば, 上式の算出値に $1/60$ を乗じ, 日雨量単位の強度 (mm/24 hr) であれば $1/24$ を乗ずると, それぞれの降雨継続期間中の降雨量 (mm) が算出される。

なお流出解析においてはハイエト グラフのピーク部の雨量が重要な役割を演ずるので, たとえば単位時間ごとの降雨量を算出するには, 最初に単位時間のピーク部雨量を算出し, その両端より順次分割して計算すればよい。 r が 0.5 の場合のピーク部雨量は, ピーク時を中心と単位時間 t の $1/2$ づつを前後にとって加算すればよい。しかし r が 0.5 以外の場合は, 所要単位時間を t , ピーク前部にとるべき時間を t_b , ピーク後部にとるべき時間を t_a とすれば $t_b = t \cdot r$, $t_a = t(1-r)$ ∴ $t = t_b + t_a$ として t_b , t_a 時間をとり, その時間内の雨量を加算してピーク部雨量を算出し, それより前後は等間隔に, 左右へ分割して行かねばならない。

計算例

図-2 の確率降雨強度曲線から求めた, 図-8 の確率 50 年ハイエト グラフ i_{s_0} を $r=0.5$ として 20 min ごとの降雨量を算出する。

図-8 の i_{s_0} の式より

$$i_b = \frac{1310[0.5\sqrt{t_b/0.5} + 3.3]}{[\sqrt{t_b/0.5} + 3.3]^2}$$

式(40)を用いてつぎのように計算される。

$$\textcircled{1} \text{ ピーク部 } (R_P = i_{t_{b,0}}^{t_{b,10}} + i_{t_{a,0}}^{t_{a,10}})$$

$$\begin{aligned} i_{t_{b,0}}^{t_{b,10}} &= 1692.8 \text{ (mm/hr)}, R_{t_{b,0}}^{t_{b,10}} = i_{t_{b,0}}^{t_{b,10}} / 60 \\ &\approx 28.2 \text{ (mm)} \end{aligned}$$

$r=0.5$ であるから 2 倍して

$$R_P = R_{t_{b,0}}^{t_{b,10}} + R_{t_{a,0}}^{t_{a,10}} = 56.4 \text{ (mm)}$$

$$\textcircled{2} \text{ } i_{t_{b,10}}^{t_{b,30}} = 1887.9 \text{ (mm/hr)} \quad \therefore R_{t_{b,10}}^{t_{b,30}} = 31.5 \text{ (mm)}$$

以下同様に

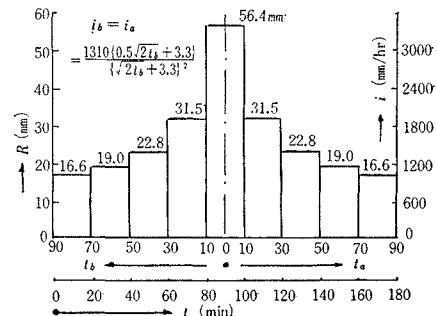
$$\textcircled{3} \text{ } R_{t_{b,30}}^{t_{b,50}} = 22.8 \text{ (mm)}$$

$$\textcircled{4} \text{ } R_{t_{b,50}}^{t_{b,70}} = 19.0 \text{ (mm)}$$

$$\textcircled{5} \text{ } R_{t_{b,70}}^{t_{b,90}} = 16.6 \text{ (mm)}$$

$R_{t_{a,30}}^{t_{a,50}}$ 以下は R_P のピーク部を中心に対称形であるから降雨継続時間を 180 min とした場合の, 降り始めより降り終りまで, 20 min ごとの降雨量は図-10 のようになる。

図-10 20 分ごと降雨量



5. 長時間降雨のハイエトグラフ

河川洪水流量のような流域が広い場合には、長時間の降雨を対象としなければならないが、一般には日雨量を単位とした降雨強度が用いられている。ここでも日雨量を単位として論を進めることにする。日雨量のみ与えられた場合の、任意時間中の降雨強度推定式としては、つぎの物部式⁸⁾、伊藤式⁹⁾、川上式²⁾がわが国では用いられている。すなわち

$$r_t = \frac{R_{24}}{24} \left(\frac{24}{t} \right)^{2/3} \quad \text{物部式} \quad (47)$$

$$r_t = \frac{R_{24}}{24} \left(\frac{34.7}{t^{1.35} + 1.5} \right) \quad \text{伊藤式} \quad (48)$$

$$r_t = \frac{R_{24}}{24} \left(\frac{30}{t+6} \right) \quad \text{川上式} \quad (49)$$

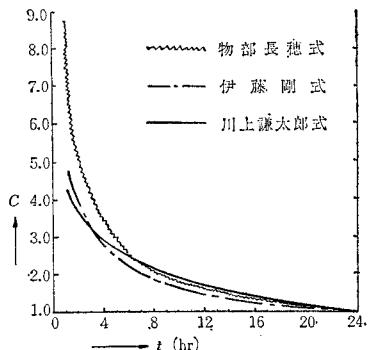
ここで、 r_t は t 時間中の平均降雨強度 (mm/hr), t は降雨継続時間または洪水到達時間 (hr), R_{24} は 24 時間雨量 (mm), $R_{24}/24$ は日雨量の平均 1 時間雨量強度である。

いま式 (47), 式 (48) および式 (49) の右辺第 1 項を r_0 , 第 2 項を C とおけば、3 式とも

$$r_t = r_0 \cdot C \quad (50)$$

となり、これらの 3 式は、すべて r_0 に強度係数 C を乗じたもので、図-11 のように示し得る。

図-11 強度係数 C の比較



式 (50) の関係式で、いま r_0 を日雨量、24 時間単位の強度にとれば、前述した筆者の特性係数法の式 (5) と同形の次式を組成することができる。

$$I^4 = R_{24} \cdot \beta \quad (51)$$

ここで、 I^4 は日雨量単位の降雨強度式 (mm/24 hr), R_{24} は 24 時間雨量または I_{24} の 24 時間雨量強度 (mm/24 hr), β は特性係数である。

いま式 (51) が式 (49) の川上式タルボット型をとるすれば、

$$I^4 = R_{24} \cdot \beta = I_{24} \left(\frac{a'}{t+b} \right) = \left(\frac{a}{t+b} \right) \quad (52)$$

となって、2. で述べた式 (4), 式 (5) の短時間降雨強度曲線式と同形にすることができます。

式 (52) は 24 時間単位の降雨強度式であり、係数 a' , b , β は前述の式 (5)～(11) と同理を用い、つぎの特性係数法で容易に求められる。ただし、この場合 β は $t=24$ で 1.0 となる。

$$\left. \begin{aligned} a' &= b+24 \\ b &= (24 - \beta_N t) / (\beta_N - 1) \\ \beta_N t &= I_t / I_{24} \\ \beta &= a' / (t+b) \end{aligned} \right\} \quad (53)$$

ここで、 $I_t = R_t \cdot 24$, $I_{24} = R_{24}$ で R_t は t 時間降雨量 (mm), R_{24} は 24 時間降雨量 (mm), β_N は N 年確率 t 時間雨量強度 I_t と N 年確率 24 時間雨量強度との比である特性係数値, t は任意の時間をとり得るが、いま 1 時間雨量をとったとすれば $I_t = R_t \times 24$, $t=1$ となり、降雨資料として最も入手しやすい、1 時間と 24 時間雨量のみで日雨量単位の降雨強度式を算定できる。

日雨量単位の降雨強度曲線 (式) I^4 を上述の手順で算出すれば、これから前述の式 (26)～(31) を応用して、日雨量単位のハイエトグラフは容易に算定することができる。

日雨量単位のハイエトグラフ計算例

わが国の近年著名災害時の毎時間雨量実測値を用いて日雨量単位のハイエトグラフを算出し、その特性をも検討する。式型としては上述のように、種々あるが各降雨について比較した結果によると、日雨量単位のような、長時間降雨の場合は Case 3 のタルボット型で十分である。

例 1

1966 年 9 月 24 日、台風 26 号による山梨県足和田村災害時の船津測候所の降雨記録を用いて計算する。

24 日午前 6 時より 25 日午前 5 時までの毎時降雨量は 1.0, 0.7, 0.7, 0.7, 1.2, 1.1, 5.2, 1.5, 1.3, 6.8, 5.6, 3.8, 10.3, 11.0, 12.0, 1.7, 3.5, 21.3, 21.0, 35.4, 68.2, 4.2, 0.3, 3.0 であった。この記録よりハイエトグラフはつぎのように算定される。

$$R_{24} = 221.5 \text{ mm}, R_1 = 68.2 \text{ mm}, r = 21/24 = 0.9$$

であるから、式 (52) の I^4 を式 (53) にしたがって算出すると各係数は

$$I_1 = 68.2 \times 24 = 1636.8 \quad I_{24} = 221.5 = R_{24}$$

$$\beta_N^{-1} = I_1 / I_{24} = 7.4 \quad b = 2.6 \quad a' = 26.6$$

$$\beta = 26.6 / (t+2.6)$$

$$\therefore I^4 = R_{24} \cdot \beta = 5892 / (2.6 + t)$$

ゆえにハイエトグラフは式 (30), 式 (31) より次式となる。

$$i_b = 15320 / \{(t_b / 0.9) + 2.6\}^2$$

$$i_a = 15320 / \{(t_a / 0.1) + 2.6\}^2$$

この結果を示すと 図-12 のようになる。図中の棒グラフが実測値で、実線が上式の計算ハイエトグラフである。

図-12 1966. 9. 24 台風 26 号山梨県足和田村災害

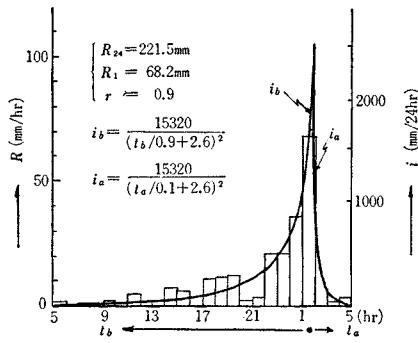


図-13 1966. 8. 15 台風 13 号大分県浅海井

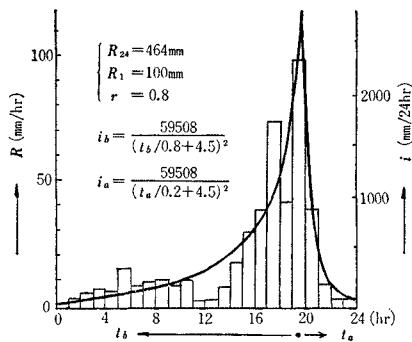


図-14 1966. 10. 13 八甲田山系北部集中豪雨

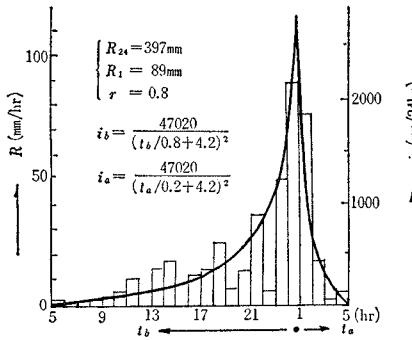


図-15 1959. 9. 26 伊勢湾台風揖斐川平均雨量

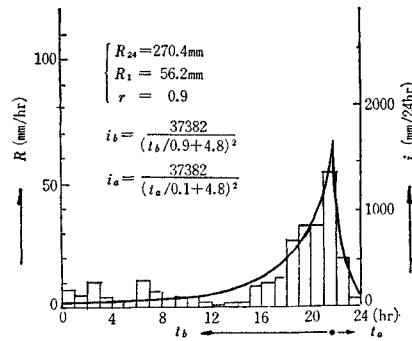


図-13 は 1966 年 8 月 15 日台風 13 号による大分県南部の浅海井駅で国鉄観測のものであり、図-14 は 1966 年 10 月 13 日八甲田山系北部集中豪雨の青森県大和山のも

図-16 1966. 10. 12 東三河集中豪雨（豊橋）

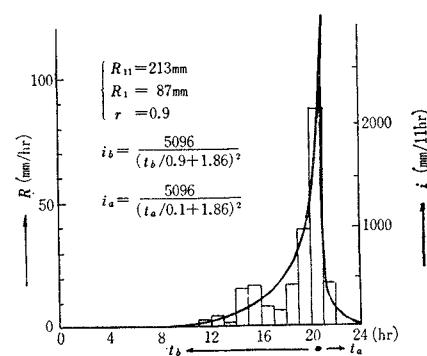


図-17 1967. 7. 9 岐市災害

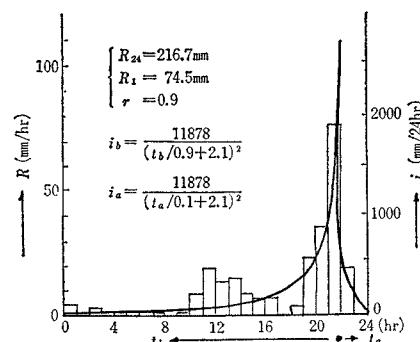
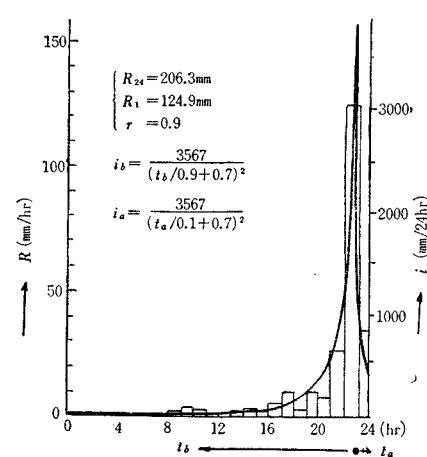


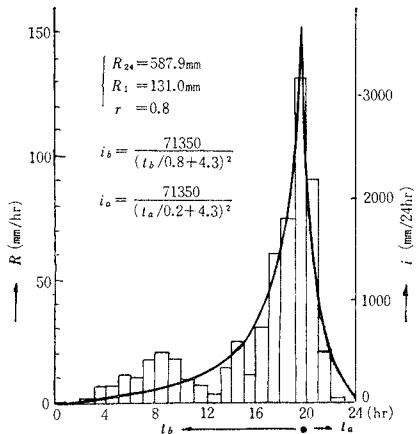
図-18 1967. 7. 9 佐世保市豪雨



の、図-15 は 1959 年 9 月 26 日の伊勢湾台風時の揖斐川平均雨量、図-16 は 1966 年 10 月 12 日東三河地方集中豪雨の豊橋市のもので、これは全降雨時間が 11 時間であったので、計算は降雨強度として $i = \text{mm}/11 \text{ hr}$ がとっている。図-17 は 1967 年 7 月 9 日の岐市の集中豪雨、図-18 は 1967 年 7 月 9 日の佐世保市の集中豪雨であり、図-19 は 1939 年 10 月 16 日台風の宮崎市既往最大降雨である。

これらの計算実例は、いずれも毎時の実測値からハイ

図-19 1939. 10. 16 台風宮崎市既往最大



エトグラフを R_{24} 、最大時間雨量の R_1 およびピーク位置の r のみで算出したものであり、適合度はきわめて良好といえる。

ここで一連降雨中のピーク位置を示す r の値が、本例ではすべて 0.8~0.9 であることは、注目すべきことである。すなわち近年の、わが国水害時においてはピーク部が全降雨期間中の後部に集中している。これは流出現象の解明において、損失降雨としての Horton の浸透能の概念^{19), 20)}や、洪水期間中の流出係数増大などを考えるときに、きわめて意義ある降雨現象の特性を示しているし、ハイエトグラフの手法によって、今まで注目されなかった重要な降雨特性の一つが明確にされたといえる。一般に流出量解析での計画降雨としては、日雨量の確率計算によって確率日雨量を算出し^{21), 22), 23)}、既往降雨記録から連続降雨型を選び、計画日雨量に応じた降雨型の縮小、拡大の手法がとられているようである。しかし上述の事実からすると、当該地方での最強雨部の位置、すなわち r 値に問題があろう。そして同一日雨量と同一ピーク時間雨量であっても、ピーク部が後部にあるものが流出量のピーク量も大きく、危険であるといえる。また従来の方法では、降雨記録による降雨型の縮小や拡大の場合に、最小実測単位時間が 1 時間のものが、ほとんどであり、そのため任意の単位時間降雨量算出にも難点があった。そこで日雨量単位での計画降雨算定法として、つぎの方法を提唱する。

① 日雨量と時間雨量の両記録が得られる場合

日雨量と時間雨量との記録を、それぞれ水文統計理論による確率計算法にて確率日雨量と確率時間雨量を算定し、計画確率年が指定されれば、その同一確率年の日、時間雨量値を用いて、前述、式(52)、式(53)の特性係数法によって日雨量単位の確率降雨強度式を求め、これより式(30)、式(31)にてハイエトグラフを算定する。この場合の r は 0.8 または 0.9 をとする。この算出されたハイエトグラフから式(45)、式(46)によって、所

望、単位または任意時間ごとの降雨量を算出する。また式型としては式(4)の Case 3 タルボット型で十分である。

② 日雨量記録のみ得られる場合

確率日雨量を計算し、計画確率年日雨量を R_{24} とする。式(52)、式(53)での係数 b を 2~5 の値をとる。これは前掲の図-12~図-20 の実例からの推定値であるが、 b の値が小さいほど、時間雨量(ピーク部)の値が大きい。 b の値を、このように指定すればただちに式(52)、式(53)から I^{24} が求まり、さらに式(30)、式(31)から i_b 、 i_a のハイエトグラフが求まる。なお、この場合も $r=0.8, 0.9$ を用いる。

③ 降雨記録が全くない場合

全国確率日雨量分布図などより²⁴⁾、当該地点の確率日雨量を推定し、②の手順にしたがってハイエトグラフを求める。この意味から確率日雨量と確率時間雨量との全国分布図の製作、整備が望まれる。

なお既往の豪雨災害時の毎時間雨量、とくに最大時間雨量と日雨量記録があれば、本文の例 1 のように解析し、その降雨特性を明らかにしておくことは、今後の計画降雨のとり方に、参考となるであろう。

例 2

M 気象台における日雨量と時間雨量との降雨記録を用い、確率計算によって確率 50 年日雨量； $R_{24}=451.7$ mm、確率 50 年時間雨量； $R_1=118.6$ mm を得た。これより $r=0.8$ として日雨量単位のハイエトグラフおよび 1 時間ごとの降雨量を求む。

式(52)、式(53)にしたがって I^{24} を算出すると

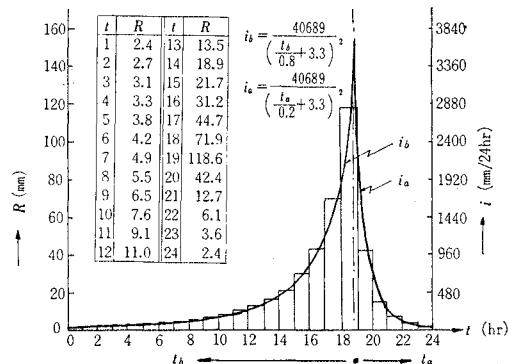
$$R_{24}=I_{24}=451.7, I_1=2846.4, \beta_{50}^1=6.3, b=3.3$$

$$a'=27.3, \beta=27.3/(t+3.3)$$

$$\therefore I_{50}^{24}=12330/(t+3.3)$$

ゆえに式(30)、式(31)よりハイエトグラフは次式となる。

$$\therefore i_b=\frac{40689}{\{(t_b/0.8)+3.3\}^2} \quad \therefore i_a=\frac{40689}{\{(t_a/0.2)+3.3\}^2}$$

図-20 確率 50 年日雨量ハイエトグラフと
毎時間降雨量(M 市)

この i_b, i_a を図示したものが 図-20 の実線である。

つぎに式(45), 式(46)を用いて各単位時間の降雨量を算出する。前述のとおり、まずピーク部から求める。

- ① ピーク部 $r=0.8$ であるから $t_b=0.8 \text{ hr}, t_a=0.2 \text{ hr}, i_{t_b}^{t_b 0.8}=2278.6, R_b=94.9, i_{t_a}^{t_a 0.2}=569.6, R_a=23.7 \therefore R_p=R_b+R_a=118.6 \text{ mm}$
- ② $i_{t_b}^{t_b 1.8}=1725.2, R_{b2}=71.9 \text{ mm}$, 以下、同様に R_{bi} .
- ③ $i_{t_a}^{t_a 1.2}=1017.2, R_{a2}=42.4 \text{ mm}$, 以下、同様に R_{ai} .

このように順次計算した値が 図-20 に示してある。

5. 結 言

連続降雨曲線としてのハイエト グラフの概念と性格、および各式型に対する基本計算式を誘導し、さらに短時間降雨と長時間降雨との両者について、特性係数法を応用して降雨強度式からハイエト グラフ式を算定する方法を提唱し、これらの成果を応用して、わが国の降雨特性の一端をも明らかにし、各種の流出解析法に適用できるような手法をも提唱例示した。

なお小流域排水計画での短時間降雨の場合には、九州地方の結果から一般的には $r=0.5$ でよいとしたが、最近のように、集中豪雨による水害が都市部にまでおよぶ現状を考えると、下水道計画のみならず市内中小河川での流出解析では、本文 4. で例示した長時間降雨のピーク部を短時間降雨として取り出し、最も危険な状態として $r=0.8 \sim 0.9$ をとるのが安全と考える。また流達時間のあまり長くない中小河川においても、日雨量単位のハイエト グラフを用い、降り始めよりの降雨量を順次算出して、それより各種の損失雨量をさし引き、有効雨量として出水解析を行なうのが適切と思われる。

本研究によって、豪雨災害時の降雨特性の数式表現化が可能となり²⁵⁾、また最近の新しい流出解析法が要求していた計画降雨としてのハイエト グラフに関する諸問題の一端をも明らかにすることができた。

最後に本研究は文部省科学研究所費、特定研究災害科学「シラス地帯の防災に関する研究（代表者 宮崎大学 小林幸治、彦坂良次）」および「内水災害の防止軽減に関する総合的研究（代表者 京都大学 角屋 瞳）」の昭和 39 年度より昭和 42 年度までの補助を受けた研究の一部であることを付記し、謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 石黒政儀：雨水流出量計算諸公式と今後の動向、下水道協会誌、Vol. 4, No. 37, 1967.6.
- 2) 川上謙太郎：河川洪水のピーク流量に関する研究、土木学会論文集、No. 79, 1962.3.
- 3) 綾出教：雨水滞水池の設計、下水道協会誌、Vol. 1, No. 1, 1964.6.
- 4) 稲場紀久雄：下水道におけるハイドロ グラフの計算法、下水道協会誌、Vol. 3, No. 22, No. 23, 1966.3.
- 5) 上田政義：下水道計画における雨水流集量について、土木学会誌、Vol. 8, No. 6, 1912.12.
- 6) Keifer, C.J. & Chu H.H. : Synthetic Storm Pattern for Drainage Design. Proc. ASCE, Paper 1332 HY 4 Aug. 1957.
- 7) Tholin, A.L. & Keifer, C.J. : The Hydrology of Urban Runoff, Proc. ASCE, 127, SA 2. Paper 1984, 1959.
- 8) 物部長穂：水理学、岩波書店、1954.
- 9) 水理公式集、土木学会、昭和 38 年改訂版。
- 10) 石黒政儀：本邦における降雨強度式型の地域的特性について、水道協会雑誌、Vol. 313, 1960.10.
- 11) 石黒政儀：日本主要都市の確率降雨強度式について、土木学会論文集、No. 64, 1959.9.
- 12) 石黒政儀：特性係数法による確率降雨強度式の算定法について、土木学会論文集、No. 74, 1961.5.
- 13) 石黒政儀：本邦における確率時間雨量と分布図について、水道協会雑誌、No. 320, 1961.5.
- 14) 石黒政儀：本邦における短時間降雨の特性係数分布図について、水道協会雑誌、No. 323, 1961.8.
- 15) 福岡管区気象台：大雨資料、10 分間降水量、1957.3.
- 16) 中安米蔵：本邦河川の単位図について、建設省第 7 回技術研究会、1956、および水理公式集。
- 17) 末石富太郎：特性曲線法による出水解析について（第 2 報）、土木学会論文集、No. 29, 1955.12.
- 18) Sueishi, T. : Runoff Estimation in Storm Sewer System using Equivalent Roughness, Trans. JSCE, No. 91, March 1963.
- 19) Horton, R.E. : The rule of infiltration in the hydrologic cycle, Trans. Am. Geophys. Union, Vol. 14, 1933, pp. 446~460.
- 20) 石原藤次郎・田中要三・金丸昭治：わが国における単位図の特性について、土木学会誌、Vol. 41, No. 3, 1956.3.
- 21) 岩井重久：Slade 型分布の非対称性の吟味およびその 2, 3 の新解法、土木学会論文集、No. 4, 1949、その他。
- 22) 石原藤次郎・高瀬忠信：対数正規分布とその積率による解法、土木学会論文集、No. 47, 1957. その他。
- 23) 角屋 瞳：極値分布とその一解法、農業土木研究、Vol. 23, No. 6, 1956. その他。
- 24) 土木設計データーブック：成瀬・本間・谷藤監修、第 IX 編、河川、森北出版 K.K. 1962 年刊。
- 25) 石黒政儀：昭和 41 年 7 月南九州災害の降雨特性について、第 3 回災害科学総合シンポジウム論文集、1966.11. (1967. 9. 19・受付)