

洪水比流量曲線へのアプローチ

角 屋 睦・永 井 明 博

ENVELOPING CURVES FOR REGIONAL FLOOD PEAKS IN JAPAN

By *Mutsumi KADOYA* and *Akihiro NAGAI*

Synopsis

It may be usefull to know the magnitude of the peak discharge of a record flood from a given drainage area for the safety design of spillway of a dam and/or for the planning of precautionary measure for flood disasters in a river basin with different drainage area of the same hydrological characteristics and under the similar meteorological conditions. Unfortunately, however, the physical or statistical characteristics of the regional maxima of flood peak has not hitherto been studied enough to sevre for the engineering practice in Japan.

A study has been carried out from the point of view that the peak discharge of flood from a river basin is the synthetic reflection of both characteristics of rainfall concentration in time and space and of runoff of the basin. The basins of the River Obata in Kinki district, the River Tozu in Kii-Nanbu district and the River Ibi in Chubu district have been chosen in order to investigate the DAD characteristics of heavy rainfalls. The equation of the peak discharge of flood from a given drainage area has been obtained by combining the equations of DAD and the time of flood concentration and drawn in a figure of $\log q$ ($\text{m}^3/\text{sec}/\text{km}^2$) to $\log A$ (km^2). Such a curve has then been slid to the $\log q$ direction to envelop flood peaks in the same district rivers. Every enveloping curve has shown good fitness far better than the Creager's curve.

Finally, the parameters in the equation of enveloping curve have been examined and adjusted to set a common form of the equation in every district in Japan. The curves from the author's equation show good fitness to record flood peaks in every district in Japan. They would be used in Japan instead of the Creager's curves.

1. ま え が き

昭和50年8月には仁淀川中下流部、翌51年9月には隣接の鏡川流域を中心とした稀有の豪雨が發生し、いずれもそれらの下流域を中心に大災害をもたらした。このように、ここ数十年の間に各地で大災害を起こした豪雨の發生状況をみると、いつも特定の一地区に集中するとは限らず、むしろ気象・地形条件の類似するかなりの広範囲の地域のあちこちにゲリラ的に發生し、特定地点のみに着目すると、いずれも記録破りの豪雨となっている。このことは、各地の地点雨量の確率分布を調べると第1ないし2位の値が飛び抜けて大きく、いわゆる異常値的性格を示している例が少なくないことからもうなずける。しかし、地点を固定することなく、ある地域内の最大雨量の形で資料を整理すると、その確率分布はかなりきれいな形にまとまる例が少なくないことも事実である。

ところで、従来河川構造物の設計では、特定地点の既往観測最大もしくは確率洪水流量が考慮されてきているが、上述の豪雨の發生状況は、このような点的な考え方では十分ではなく、むしろ面的発想への切換えの必要なことを、すなわち災害対策の基礎となる水文資料の取扱には、気象・地形条件の類似する広汎な地域を包括した地域最大の概念の導入が必要なることを警告しているように思われる。しかしながら、わが国ではこれまで地域最大洪水流量に関する科学研究はほとんど行われていない。

本研究は、一応中小河川を念頭におきつつ、地域最大洪水流量を比流量形式で表現する場合の関数形につ

いて半理論的実証的に攻究するとともに、それを総合化して全国の各地域別観測最大洪水比流量包絡線の関数表示を試みたもので、これがわが国の水害対策上の資料となりうれば幸と考えている。

2. 最大洪水比流量曲線の関数形

2.1 従来の研究

河川のある地点に起こりうる洪水流量極値を予知することは容易ではないが、その一つの便法として既往観測最大洪水比流量 q を流域面積 A に対してプロットし、その包絡線の関数表示を試みた研究はいくつかみられる。その大半は、定数 C_1, n を用いて、 $q = C_1 A^n$ と表現したものであるが、Creager¹⁾ (1941) は、指数 n を単なる定数ではなく、面積の関数とした次式を提案した。

$$q = 46 C_2 A^{(0.894 A^{-0.048} - 1)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 q : ft³/sec/mile², A : mile², C_2 : 規模定数と呼ばれ、観測最大値包絡線としては $C_2 = 100$ 。

Creager 曲線と呼ばれる著名なこの式の単位をメートル単位にした近似的換算式が、建設省土木研究所²⁾によって次のように示されている。

$$q = C_3 A^{(0.9784 A^{-0.0468} - 1)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 q : m³/sec/km², A : km², C_3 : 地域定数。

これは簡単巧妙な式であるが、経験式であって理論的根拠に乏しく、またこれをわが国諸河川に適用すると、全般的に適合性が悪く、とくに小流域河川ではきわめて過大な値を与える欠点がある。このことは気象・地形条件の異なる外国の経験式を、そのままわが国に適用することの非を意味するものといえよう。

このような難点を改善するためには、洪水比流量曲線を経験的に定めるのではなく、理論的な立場からの考察が必要である。もとより複雑な出水現象を対象とするだけに、簡単にその解を期待することはできないが、少なくとも、河川のある地点で観測される洪水ピーク流量は、それより上流域における豪雨の時空間的集中特性とその流域のもつ流出特性の総合的相乗効果にほかならない、ということに着目する必要がある。

以下ではこうした観点から若干の考察を進める。

2.2 DAD曲線

豪雨時の流域平均最大雨量 (Depth) と、流域面積 (Area)、継続時間 (Duration) との関係を表わす DAD 曲線は、豪雨の時空間的集中特性を表現する重要なものであって、諸外国では古くからかなり研究されているが、わが国では点雨量ないし強度を対象とした DD 曲線についての研究がいくつかみられる程度で、DA 曲線についての研究は皆無に近い。これは、一つにはその応用面が未開拓で、実用的価値が十分認識されていなかったためと思われる。しかし前述の洪水比流量曲線の議論を進めるためには、DAD 曲線の関数形が重要であるので、まずこれについて考察する。なお本来 DAD 曲線は気象学的観点から進められるべきと思われるが、これまでのこの種の研究はほとんどなく、統計的研究に終始しているのは、現象のむずかしさによるものといえよう。

さて DAD 曲線式としては、これを単一関数で表現する形式と、DD 式・DA 式の結合形式が考えられる。前者の研究はほとんど皆無であるが、われわれは DD 特性と DA 特性の類似性から次式を提唱する。

$$P = \frac{at}{t^c + kt^d(A - A_0)^{\gamma} + b} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 P : 面積 A に対する平均雨量 (P/t : 平均降雨強度), A_0 : 実用上点最大雨量 P_0 と等しくなる面積; t : 継続時間; a, b, c, d, k, γ : 定数。

実用上、 $b = 0$, かつ $d = c$ または 0 が期待できれば好都合であるが、前者が $t > 1 \sim 2$ 時間の継続時間に対して多くの場合許されるとしても、後者 $d = c$ または 0 の期待は無理なようである。しかし $b = 0$ と表現できれば、定数推定は簡単で³⁾、実用的価値は大きい。上式に基づく DD 式、DA 式が次式のようになることは自

明である。

$$\text{DD: } P_0 = \frac{at}{t^c + b} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\text{DA: } \frac{P}{P_0} = \frac{1}{1 + \lambda(A - A_0)^\gamma}, \quad \lambda = \frac{kt^d}{t^c + b} \quad \dots\dots\dots(5)$$

とくに, $b = 0$, $A_0 = 0$ ならば

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{1 + \lambda A^\gamma}, \quad \lambda = kt^d - c \quad \dots\dots\dots(6)$$

一般に DAD 式とみられている Fletcher 式⁴⁾ は, 定数 a , b , c を用いて

$$P = \sqrt{t} \left(a + \frac{b}{\sqrt{A+c}} \right) \quad \dots\dots\dots(7)$$

と表現されるが, 明らかに D A 式と後述の Sherman 型 D D 式との結合形であって, それぞれ次式になる。

$$\text{DD: } P_0 = k' \sqrt{t}, \quad k' = a + b/c \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\text{DA: } \frac{P}{P_0} = a' + \frac{b'}{\sqrt{A+c}}, \quad a' = a/k', \quad b' = b/k' \quad \dots\dots\dots(9)$$

多くの場合, $a \ll b/c$, であるので, (3)~(6) 式の特別な場合とみなされよう。

次に D D 曲線式について考察する。D D 式としてはこれまで 10 種ほどの式が提案されているが, 実用的には次の 3 定数式

$$i = \frac{a}{t^c + b} \quad \dots\dots\dots(4')$$

$$i = \frac{a}{(t+b)^c} \quad \dots\dots\dots(10)$$

を一般的なものとみてよい⁵⁾。(4') 式は (4) 式と同等で, わが国で主用されている Talbot 式 $i = a/(t+b)$, Sherman 式 $i = a/t^c$, 久野式 $i = a/(\sqrt{t} + b)$ は, いずれも (4') 式の特別な場合に相当する。(4') 式は実資料との適合性もよく, かつ定数推定も 10 式より容易であることから, これを代表的な DD 式とみてよいであろう。

さて問題は D A 曲線の関数形である。これまで提案されている代表的な D A 式を, 考察の便宜上, 級数展開形式とともに示すと次のようである。

$$\text{Horton}^{6)}: \quad \frac{P}{P_0} = \exp(-\alpha A^\beta) = 1 - \alpha A^\beta + \frac{1}{2!}(\alpha A^\beta)^2 - \frac{1}{3!}(\alpha A^\beta)^3 + \dots \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$\text{角屋・永井}^{3)}: \quad \frac{P}{P_0} = \frac{1}{1 + \lambda A^\gamma} = 1 - \lambda A^\gamma + (\lambda A^\gamma)^2 - (\lambda A^\gamma)^3 + \dots \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$\text{Woolhiser-Schwalen}^{7)}: \quad \frac{P}{P_0} = 1 - \frac{\eta}{P_0} A^\xi \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$\begin{aligned} \text{U.S.W.B}^{8)}: \quad \frac{P}{P_0} &= 1 - \exp(-1.1t^{0.25}) + \exp(-1.1t^{0.25} - \mu A) \\ &= 1 - T\mu A + \frac{T}{2!}(\mu A)^2 - \frac{T}{3!}(\mu A)^3 + \dots \quad \dots\dots\dots(14) \end{aligned}$$

$$\text{Fletcher: } \quad \frac{P}{P_0} = a' + \frac{b'}{\sqrt{A+c}} = \frac{1}{1 + (1/c)\sqrt{A}} \quad \dots\dots\dots(15)$$

ここに, α , β , γ , η , ξ , μ : 定数, λ : 時間の関数になってもよい定数, T : 時間の関数。

上掲諸式において A の代りに $A - A_0$ とおく修正形式も考えられるが, ここでは煩雑さを避けるため省略した。

さて D A 曲線に Horton 式を適用すると, 定数 α を継続時間の関数とせざるを得ない場合がある。その意味では著者らの式とほとんど同形式とみられるが, 流域面積が大きくなるに伴い若干の差を生じる。12 式で,

$\gamma = 1$, λ ; 定数ならば Chow の式になる。Woolhiser らの式は Horton 式や著者らの式で, $\alpha = \lambda/\eta/P_0$, $\beta = \gamma/\xi$ といったものに近く, α や λ が点最大雨量 P_0 の関数となっているのが注目されるが, 逆にこのため適用範囲が $A \ll (P_0/\eta)^{1/\xi}$ の流域に限られることになる。U. S. W. B. (U. S. Weather Bureau) 式では, $\mu = 0.01 \text{ mile}^{-2}$ の特定値をとっているが, この制限を外すと Horton 式で $\beta = 1$ の特殊形式であり, Horton 式の α が時間の関数になりうることを許容すれば, Horton 式の特別な場合とみられよう。Fletcher 式から得られる D A 式は, 前にも述べたように, D2 式の特殊な場合に相当する。

以上の諸式のほか, 特殊なものとして次の式がある。

$$\text{Boyer}^{7)}: \frac{P}{P_0} = e^{-\alpha x} \quad \dots\dots\dots (16)$$

この式は, 最大値 P_0 の発生地点より距離 x の地点の雨量を表現しているが, いま流域を円形, かつ P_0 はその中心に発生すると仮定して流域平均雨量 P を求め, D A 式を定めると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{1}{A} \int_0^x 2\pi x P_x dx = \frac{2P_0}{x^2} \left\{ \frac{1-e^{-\alpha x}}{\alpha^2} - \frac{x e^{-\alpha x}}{\alpha} \right\} \\ \frac{P}{P_0} &= \frac{2\pi}{a^2 A} - \left(\frac{2\pi}{a^2 A} + \frac{2\sqrt{\pi}}{a\sqrt{A}} \right) e^{-\sqrt{A/\pi}} = 1 - \frac{2a}{3\sqrt{\pi}} \sqrt{A} + \frac{a^2}{4\pi} A - \dots \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (17)$$

すなわち, Boyer 式は一見きれいな形をしているが, D A 式としては扱いにくいようである。強いていえば, この式は Horton 式において $\alpha = 2a/3\sqrt{\pi}$, $\beta = 0.5$ の場合に近似しているとみられよう。

以上の形式の他に, Gupta 式, Rostomov 式もあるが⁹⁾, 理論上, D A 式として満足すべき条件を満たしていないので論外とする。

さて以上のようにみえてくると, Horton 式の定数に緩和条件を付すと, いずれの提案も Horton 式と大差のない形をしているとみてよさそうである。そこで以下の議論では Horton 式を一応の原形とし, 必要に応じて他の式をも検討することにする。

2. 3 洪水比流量曲線

河川のある地点の洪水ピーク流量は, それより上流域における豪雨の時空間的集中特性と, その流域の出水特性との総合的相乗効果であるという立場をとるとき, それを端的に表現する式として次式が考えられる。

$$q = \frac{Q_p}{A} = \frac{1}{3.6} r_e \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここに, q : 洪水ピーク比流量 ($\text{m}^3/\text{sec}/\text{km}^2$), Q_p : 洪水ピーク流量 (m^3/sec), A : 流域面積 (km^2), r_e : 洪水到達時間内の流域平均有効降雨強度 (mm/hr)。

上式は, いうまでもなく合理式と呼ばれるものであるから, 適用上留意すべき問題をいくつか含んでいる。その最大の問題は, いかに合理的に r_e を推定するかである。以下, 前項の考察結果を踏まえて, 洪水比流量曲線の一原型の誘導を試みる。

i) D A 式: Horton 型修正式

$$\frac{P}{P_0} = \exp\{-\alpha(A - A_0)\beta\} \quad \dots\dots\dots (19)$$

ii) D D 式: 3 定数型一般式

$$i = \frac{a}{t^c + b} \quad \dots\dots\dots (20)$$

iii) 洪水到達時間式: 角屋・福島公式¹⁰⁾

$$t = C_p A^{0.22} r_e^{-0.35} \quad \dots\dots\dots (21)$$

ここに, C_p : 土地利用状態に応じて異なる定数。

いま有効降雨強度 r_e は便宜的にピーク流出係数 f を用いて流域平均降雨強度より定めうるものとする

と、有効降雨強度に関する DAD 式は次式で表現できる。

$$r_e = \frac{a}{t^c + b} \exp\{-\alpha(A - A_0)^\beta\} \quad \dots\dots\dots (22)$$

これを (21) 式と組み合わせると次式が得られる。

$$r_e = \frac{fa}{C_p^{\varepsilon} A^{0.22\varepsilon} r_e^{-0.35\varepsilon} + b} e^{-\alpha(A - A_0)^\beta} \quad \dots\dots\dots (23)$$

上式より得られる r_e が、(18) 式に用いられるべき r_e の値であるから、これが洪水比流量曲線の一原型を与えることになるが、陰形式で不便である。そこで区間近似によって $b = 0$ とおけるものとして再整理すると、結局次式が得られる。

$$q = KA^{-\varepsilon} \exp\{-\delta(A - A_0)^\beta\} \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$\left. \begin{aligned} K &= (1/3.6) (fa/C_p^{\varepsilon})^{\varepsilon}, \varepsilon = 0.22cu \\ \delta &= \alpha u, u = 1/(1 - 0.35c) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (25)$$

上式が、われわれが提案する洪水比流量曲線の一つの実用的関数形である。式中、 $\exp$ の項は豪雨の DA 特性の表現にほかならないから、DA 式として (19) 式よりもさらに適切な表現法が見出されるならば、この項の表現を変更すればよいことになる。また上式は、一見多くの未定定数を含むきらいがあるが、それらのほとんどが DA、DD 式の吟味により定まる特徴を持っている。なおかなりの広範囲の地域について DAD 特性を吟味することは容易でないので、まず特定の河川流域についてそれを調べた後、それぞれの地域の観測最大洪水比流量包絡線へ拡大適用を試みることにする。

3. 小畑川上流域の DAD 特性と近畿河川の洪水比流量曲線

京都市西南山地を含む小畑川上流域 (24 km²) の昭和 44~51 年の 8 年間の年最大級降雨を対象として DAD 特性を吟味した。Fig. 1 に示すように流域を 6 分割し、各ブロックの 1~8 時間雨量を等雨量線図法で求めた後、ブロック雨量の大きい順にブロックを連結して $P \sim A$ 曲線を描き、特定面積 $A_* = 2.7, 5, 12$,

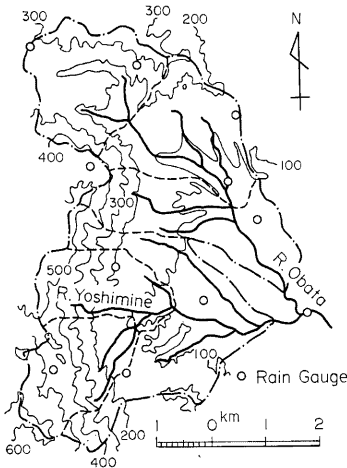


Fig. 1. Physiographical map of the upper basin of the River Obta.

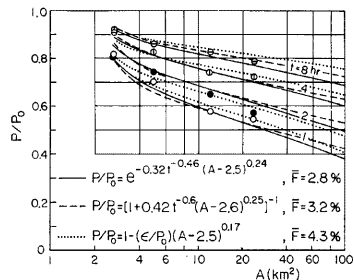


Fig. 2. DA curves for the average value of P/P_0 of the first and second maximum rainfall intensities in the upper basin of the River Obta, 1969-1976.

24 km² の流域平均雨量を内挿的に推定した。統計年数が短いためこれらの確率分布の評価はうまくいかない。そこで各継続時間ごと、 A_* ごとの第1位、及びそれとほぼ同規模の第2位の値を含めた第1, 2位の P/P_0 の平均値を D A 解析の対象にした。 P/P_0 の値は継続時間により異なり、第1位の値のみではその変化傾向が明瞭でないが、1, 2位平均値については、Fig. 2 のような結果が得られた。Fig. 2 には、Horton 修正式、角屋・永井式、及び Woolhiser-Schwalen 修正式のあてはめの結果と、次式で定義される相対誤差が示されている。

$$F = \frac{100}{N} \sum \frac{|P_i - \hat{P}_i|}{P_i} \quad \dots\dots\dots (26)$$

ここに P_i : 観測値, $\hat{P}_i$: 計算値, N : データ数。

いずれも大差のない良好な適合度を示しているが、Horton 式の定数 α が時間の関数となっているのが注目されよう。

次に D D 式で第1位の値について求めると、次式が得られた (mm-hr 単位)。

$$\left. \begin{aligned} i &= \frac{218}{t^{0.994} + 2.92}, & F &= 1.7\% \\ i &= \frac{59.0}{t^{0.46}}, & F &= 4.0\% \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (27)$$

上述の小畑川流域の DAD 特性を利用して洪水比流量曲線式を誘導してみよう。D D 解析の結果は、(27) 式にみられるように Sherman 型を用いてもよさそうであるが、D A 式が A_0 の項を含み、かつ継続時間の関数となっているから、いずれにしても洪水比流量曲線式を解析的に定めることはむづかしい。そこで D D 式としては精度のよい3定数式を、D A 式として Horton 修正式を用いて次のように近似解を求めることにする。いま洪水到達時間式、及びとりあえず $f = 1$ として有効降雨 DAD 式を q について表現すると次式が得られる (m³/sec/km²-hr 単位)。

$$q = 25 A^{0.629} t^{-2.857} \quad \dots\dots\dots (28)$$

$$q = \frac{60.5}{t^{0.994} + 2.92} \exp\{-0.32 t^{0.46} (A - 2.5)^{0.24}\} \quad \dots\dots\dots (29)$$

上式の連立解が所要の解となるから、両式に適当な t を仮定して $q \sim A$ 曲線を描き、両曲線の交点を求めればよい。Fig. 3 はそれを示したものである。この解は $A = A_0$ の近傍で急変することになるが、いま強引に (24) 式で $A_0 = 0$ とした式を最小二乗法的にあてはめると Fig. 4 点線が得られる。さらにこの曲線を、近畿地方諸河川の観測最大洪水比流量を包絡するように、上方に平行移動すると、Fig. 4 の実線が得られる。これを近畿地方観測最大洪水比流量包絡線とみなすには多少問題があるが、同図に示す Creager 曲線 (ダム流域のみに適用、破線) よりは適合性がよいといえよう。

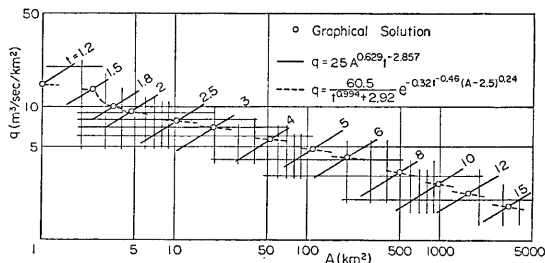


Fig. 3. A graphical solution for a curve of flood peaks based on the DAD equation in the upper basin of the River Obta.

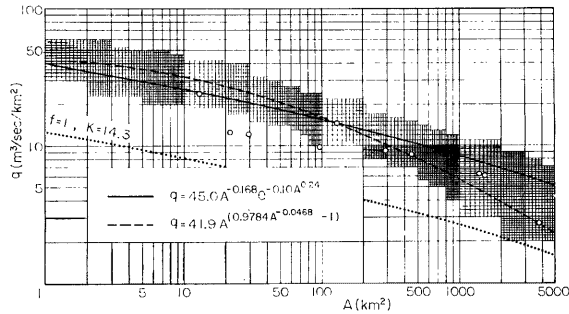


Fig. 4. An enveloping curve for flood peaks in Kinki rivers.

4. 十津川上流域の DAD 特性と南紀河川・南四国南九州河川の洪水比流量曲線

わが国有数の豪雨地帯である南紀十津川上流域（718 km²）の昭和29～50年の22年間の豪雨資料に基づいて DAD 特性を検討してみた。Fig. 5 に気象庁，建設省，奈良県，電源開発等の諸官公庁・電力会社の所管する雨量観測点を示すが，昭和40年以前の観測点はこれらの半数以下であった。Fig. 5 に示すように検討流域を8ブロックに分割し，ティーセン法と等雨量線図法を併用して各ブロック平均雨量を求めた後，小畑川流域と同様，大きさの順にブロックを連結して $P \sim A$ 曲線を描き，特定面積 $A^* = 100, 200, 400, 718$ km² に対する流域平均雨量を内挿的に推定した。次に各 A^* についての最大雨量を継続時間別に抽出し，DAD 特性を吟味すると，Fig. 6 にみられるように，各継続時間ともほとんど同一の DAD 特性を示すこと，式表示では Horton 式が最も適合性のよいことなどがわかった。また継続時間別最大値についての DAD 式としては次式が得られ，Sherman 型とみても実用上十分な精度を持つと判断された（mm-hr 単位）。

$$\left. \begin{aligned} i &= \frac{92}{t^{0.212} - 0.1}, & F &= 1.7\% \\ i &= \frac{105}{t^{0.24}}, & F &= 2.6\% \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (30)$$

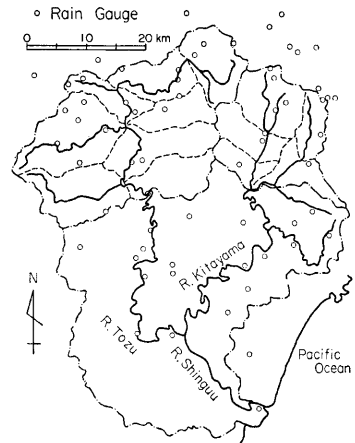


Fig. 5. Physiographical map of the basin of the River Tozu.

そこで一応 $f = 1$ とおくと，洪水比流量曲線は解析的に簡単に求まることになる。Fig. 7 の点線がその解であるが，これを南紀諸河川の観測最大洪水比流量を包絡するように上方に平行移動すると，同図実線が得られ，同図に破線で併示している Creager 曲線よりも適合性のすぐれた結果となっている。

またこの結果をそのまま無修正で，南四国・南九州地域諸河川の洪水比流量図に挿入した結果を Fig. 8 に示すが，これまた申し分のない適合性を示しているといえよう。

5. 揖斐川上流域の DAD 特性と中部河川の洪水比流量曲線

木曽三川流域の昭和34～51年の，気象庁，建設省，福井県，電源開発，中部電力等官公庁会社所管の豪雨

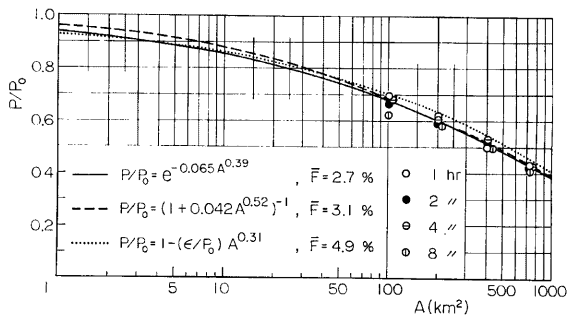


Fig. 6. A DA curve for the maximum rainfall intensities in the upper basin of the River Tozu, 1954-1975.

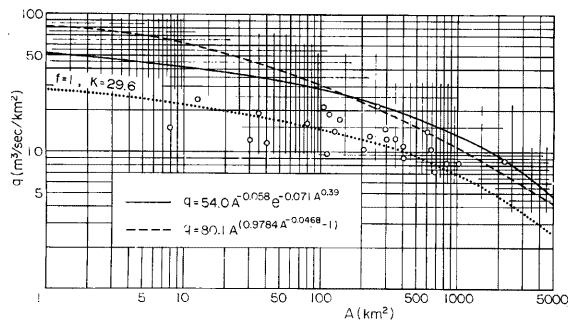


Fig. 7. An enveloping curve for flood peaks in Kii-Nanbu rivers.

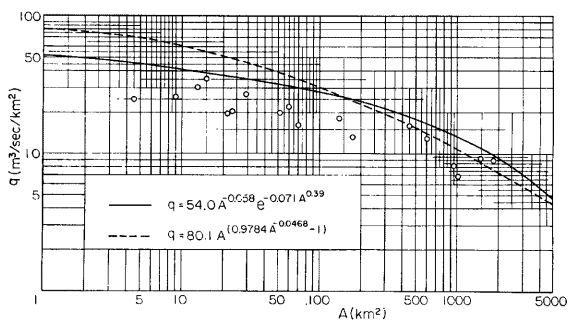


Fig. 8. An enveloping curve for flood peaks in Shikoku-Nanbu and Kyushu-Nanbu district rivers. The curve is the same as in Fig. 7.

資料を調査した結果、豪雨量の大きさ及び雨量計密度の点を勘考して、揖斐川上流域 (1,142 km²) を研究対象流域に選定し (Fig. 9)、とくに大きな6豪雨を対象として、前節同様の手法で、 $t = 1 \sim 8$ 時間の流域平均雨量を等雨量線図法で求めた。

まず流域内点最大降雨強度に対しては、次の Sherman 型 DD 式がよく適合することを確かめた。

$$i = \frac{93.5}{f^{0.24}}, \quad F = 2.0\% \quad \dots\dots\dots (31)$$

次に、第1, 2位の豪雨を対象として DA 特性を調べたところ、いずれも時間に依存するが規則性は明瞭でないことがわかった。これは、これらの値が1, 2個の豪雨で占められているという特殊性のためである。そこで次の二つの便法を採用することにした。

まず第1位の値に対し、継続時間 t ごとに Horton 型 DA 式をあてはめ、 $f = 1$ として有効降雨強度 r_e に対する DAD 式を作り、洪水到達時間式と連立して t ごとの $r_e \sim A_t$ 曲線の交点 A_t を図解的に求めた。次にこれらの A_t に対応する P/P_0 を通るように、再び Horton 式をあてはめて得られる式を、求めるべき DA 式とした。

$$\frac{P}{P_0} = \exp(-0.035 A^{0.43}) \quad \dots\dots\dots (32)$$

これは、洪水到達時間を考慮して、小流域では短時間、大流域では長時間雨量を重視して一本の DA 式を定めたことになる。Fig. 10 はその結果を示している。

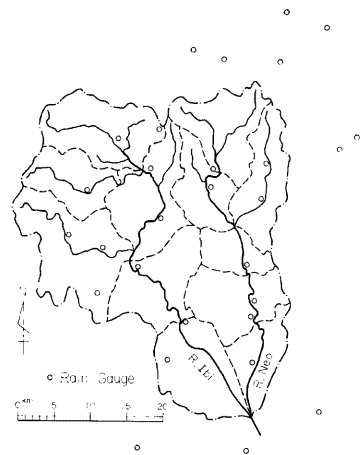


Fig. 9. Physiographical map of the upper basin of the River Ibi.

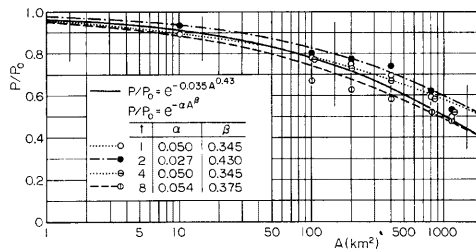


Fig. 10. Assumed and synthesized DA curves for the maximum rainfall intensities in the upper basin of the River Ibi, 1959-1976.

いま一つの便法として、1, 2位の値に対する P/P_0 の平均値について、ばらつきを無視して一本の DA 式を直接定める方法を取り、次式を得た。

$$\frac{P}{P_0} = \exp(-0.045 A^{0.38}), \quad F = 5.8\% \quad \dots\dots\dots (33)$$

次に、上述のように定めた DA 式に基づき、前節までの方法と同様に、とりあえず $f = 1$ として、洪水比流量曲線式を解析的に求め、中部地方諸河川の観測最大洪水比流量を包絡するように上方に平行移動した。その結果を Fig. 11 に示す。2本の異なる DA 曲線式を用いたにもかかわらず、結果として得られる洪水比

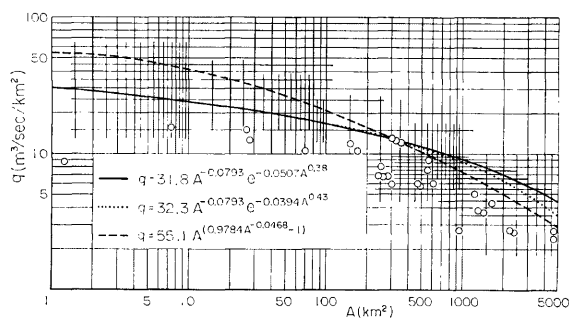


Fig. 11. An enveloping curve for flood peaks in Chubu rivers.

流量包絡線はほとんど差異がなく、破線で併示されている Creager 曲線よりもはるかに適合度のよい結果を示していることがわかる。

6. 洪水比流量曲線の総合化 一地域別観測最大洪水比流量包絡曲線の設定一

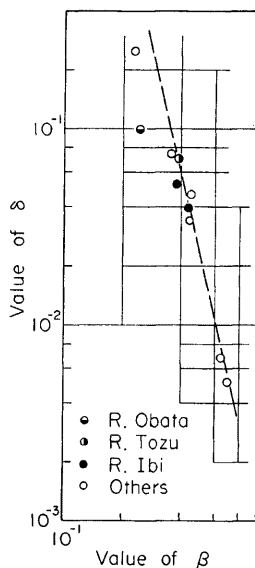
前述各節において、「洪水ピーク流量は、それより上流域における豪雨の時空間的集中特性と、流域の流出特性との総合的相乗効果にほかならない」という観点より演繹的に定めた洪水比流量曲線が、それぞれの地域諸河川の観測最大値をよく包絡でき、少なくとも経験的に定められた Creager 曲線よりもはるかに良好な適合性を示すことを明らかにした。しかしながら、この半理論的洪水比流量曲線式に含まれる諸定数は、標本として抽出した特定の河川流域の資料に基づいて推定したものであるため、地域ごとにばらつきがあり、整合性は十分でない。そこでここでは他流域における検討結果をも参照して、整合性に留意しつつ、洪水比流量曲線式の総合化を試みる。

さて洪水比流量曲線式の一原型として示した(24)式は、これまでの検討結果よりみて、実用上 $A_0 = 0$ とした次式でよさそうである。

$$q = KA^{-\delta} \exp(-\delta A^{\beta}) \dots\dots\dots (34)$$

この式は、一応理論的な考察から得られた式ではあるが、いま $\log q$ を縦軸に、 $\log A$ を横軸にとって表現される曲線形状に注目すると、 K は上下方向の位置を、 $A^{-\delta}$ は曲線の傾きを、そして $\exp$ の項とくに β の値はこの曲線の曲率の程度を表現するものといえる。

いまとくに $\exp$ の項に着目すると、 δ 、 β は豪雨の時空間的集中特性に關与する定数であるから、DA式を一雨ごとに定めたとすれば、これらの値は雨ごとに異なり、また確率的配慮もしくは観測最大面積雨量の観点より定めたとすれば、これらの値は対象地域ごとに異なり統計年数の影響を受ける可能性もある。しか

Fig. 12. The relation between β and δ .

しいずれにしても、ある一つの曲線を表現するパラメータであるから両者は無関係ではあり得ないはずである。こうした意味で、前述の検討結果、及び他流域における検討の結果¹¹⁻¹⁵⁾ 得られた δ と β の関係を調べると Fig. 12 が得られた。いま曲率の程度を左右する β の値をそれぞれの地域で試定された洪水比流量曲線との関連で考察すると、 β の大きい地域では流域面積の大きい部分での曲がりややきつく、 β 値の小さい地域では曲率が不足気味である。これに対し、 $\beta = 0.4 \sim 0.45$ の地域では全般的に適合性が良好で、かつこの値は β の変化範囲の平均的な値にも相当している。もとより中小河川流域を念頭におきつつ行ったわれわれの研究目標よりすれば、必ずしも大流域に対する適合性を意識する必要はないかも知れないが、適合範囲が広ければ広いほど、実用上好都合という考え方もできよう。こうした観点から若干の吟味を進めたところ、 δ の値は β の値に対してはほぼ一義的に定まることもあって、結局 $\beta = 0.45$ 、 $\delta = 0.04$ の組合せが最良と判断された。

次に $\exp$ の項を固定して、 $A^{-\varepsilon}$ で表現される曲線の傾きを吟味したところ、 $\varepsilon = 0.06$ と固定しても、大きな不都合を生じないことがわかった。

以上のようにして、 $A^{-\varepsilon}$ 及び $\exp$ の項が固定できるとすると、全国各地域の洪水比流量の大小は、残る定数 K によって表現できることになり、全般に整合性のよい表現が得られることになる。

以上の検討結果に基づき、われわれはあらためて全国の地域別観測最大洪水比流量包絡曲線式として、次式を提案したい。

$$q = KA^{-0.06} \exp(-0.04A^{0.45}) \quad \dots\dots\dots (35)$$

ここに、 q ：洪水比流量 ($\text{m}^3/\text{sec}/\text{km}^2$)、 A ：流域面積 (km^2)、 K ：地域係数。

ここで採用する地域区分は、建設省河川砂防技術基準 (案)¹⁶⁾ や大ダム会議ダム設計基準のそれに一応準

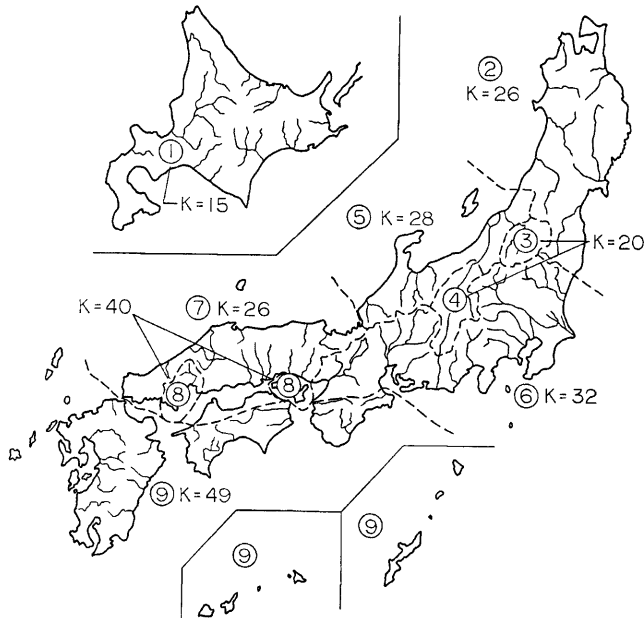


Fig. 13. The region map for the enveloping curve of flood peaks.

抛することとするが、次の諸点を変更する。

福島県阿賀野川流域・長野県：気象条件やこれまでの観測値より判断して、北陸地域または中部地域より分離する。

瀬戸内特別域：紀伊水道より侵入する南東風により豪雨の発生しやすい淡路島・小豆島周辺地域、及び豊後水道より侵入する南西風により集中豪雨の可能性のある広島県広島大川流域以西で瀬戸内海に流入する河川流域を瀬戸内地域より分離する。ただし後者（本研究所中島教授の教

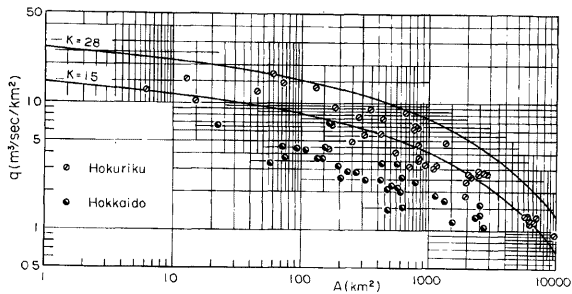


Fig. 14. Record flood peaks and the proposed enveloping curves, Hokkaido and Hokuriku.

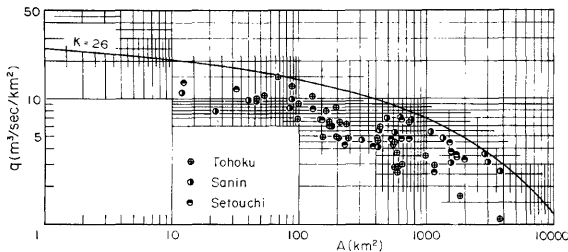


Fig. 15. Record flood peaks and the proposed enveloping curve, Tohoku, San-in and Setouchi.

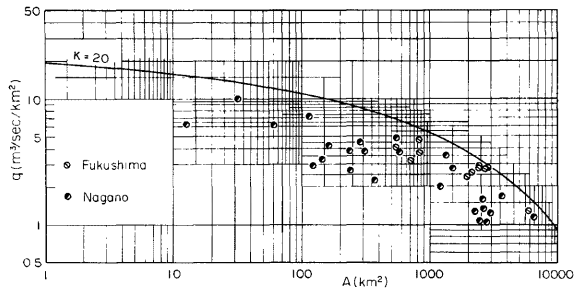


Fig. 16. Record flood peaks and the proposed enveloping curve, Fukushima and Nagano.

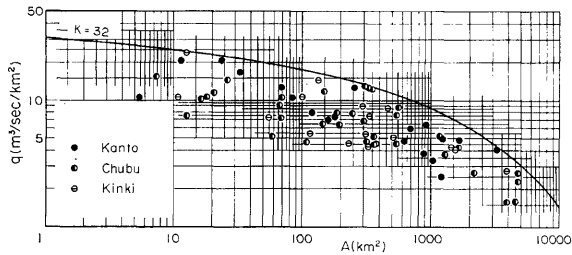


Fig. 17. Record flood peaks and the proposed enveloping curve, Kanto, Chubu and Kinki.

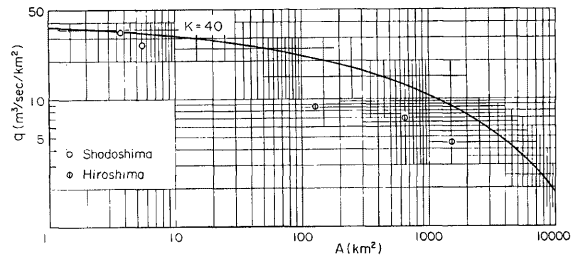


Fig. 18. Record flood peaks and the proposed enveloping curve, Setouchi Special Region.

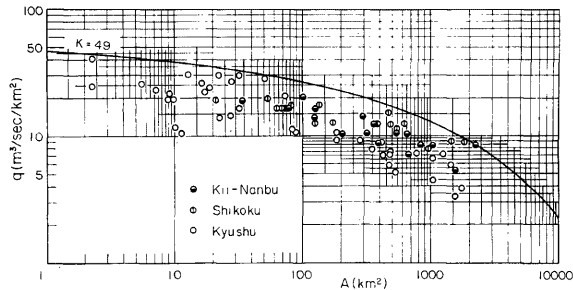


Fig. 19. Record flood peaks and the proposed enveloping curve, Kii-Nambu, Shikoku-Nambu and Kyushu.

示による)の妥当性を実証する洪水資料は未入手である。

上述の提案にしたがえば、**Fig. 13**の地域区分図にみられるように、従来別々の地域とみられていた南紀・四国南部・九州各地域間の差はなくなり、関東・中部・近畿もほとんど同程度の洪水比流量が期待され、また山陰・瀬戸内及び東北各地域の洪水も同程度と判断されそうである。

以上のように提案する地域別洪水比流量包絡曲線を観測値(ただし雨量からの推算値は除外し、かつ河川・ダム流域を区別しない)と対比した結果を **Fig. 14~19** に示す。

7. む す び

本報告では、災害対策上有用と思われるにもかかわらず、従来ほとんど科学的メスの加えられていなかった地域最大洪水比流量曲線を、半理論的実証的に攻究するとともに、これらを総合化して、わが国の地域別観測最大洪水比流量包絡曲線を提案した。

しかしながら、本研究は一応理論的観点から出発して合理的に洪水比流量曲線の関数形を類推し、観測値と対比してパラメータを定めるという半理論的攻究法をとってはいるものの、最終的には気象学的要素を十分検討することなく、統計的な解を求めた結果となっている。したがって、地域区分、起こりうる豪雨極値・洪水極値ないしはそれらの確率的評価、DAD 曲線の理論的決定法など、今後検討すべき多くの問題を残している。これらについては、さらに攻究を続け、より合理的な地域別洪水比流量曲線の設定に努力したいと考えている。

本報告は、昭和52・53年度文部省科学研究費による研究成果の一部であるが、本研究に際し、同上研究費による洪水比流量研究グループの多くの方々、本研究所中島教授から有益な討議助言を受け、また建設省土木研究所・近畿地方建設局及び九頭竜ダム管理所・中部地方建設局及び木曽川上流工事事務所・農林水産省構造改善局・奈良県土木部・福井県土木部・電源開発株式会社紀和電力所及び御母衣地区電力管理所・中部電力株式会社など、諸官公庁会社の担当部課の多くの方々の協力援助を受けたことを記し、深謝の意を表する。また、本研究の一部、十津川上流域の DAD 特性と南紀河川の洪水比流量曲線の設定には、本学工学部学生野口美具氏（現大学院学生）の絶大な協力を得たことを併記し、深謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Creager, W.P. et al.: Engineering for Dams, 1, J-Wiley, 1944, pp. 125~126.
- 2) 建設省土木研究所：全国ダム地点地域別比流量図，土木研究所資料，1093，1976.
- 3) 角屋 睦・永井明博：D A 曲線式の議論，ダム頭首工の安全設計資料としての洪水比流量に関する研究，昭和52年度科学研究費報告書，1978，pp. 19~31.
- 4) Fletcher, R.D.: A Relation Between Maximum Observed Point and Areal Rainfall Values, Trans. AGU, 31, 1950, pp. 344~348.
- 5) 田中礼次郎・角屋 睦：降雨強度式に関する研究，農業土木学会論文集（投稿中）.
- 6) Horton, R.E.: Discussion on Distribution of Intense Rainfall, Trans. ASCE, 87, 1924, pp. 578~585.
- 7) Eagleson, P.S.: Dynamic Hydrology, McGraw-Hill, 1970, pp. 195~199.
- 8) Eagleson, P.S.: Dynamics of Flood Frequency, WRR 8-4, 1972, pp. 878~898.
- 9) Sokolov, A.A. et al.: Flood Flow Computation, Uneso Press, 1976, pp. 124~127.
- 10) 角屋 睦・福島 晟：中小河川の洪水到達時間，京大防災研年報，19 B-2, 1976, pp. 143~152.
- 11) 桜田純司：北海道における洪水比流量に関する研究，昭和53年度科学研究費（試験研究）ダム頭首工の安全設計資料としての洪水比流量に関する研究（代表者角屋 睦）成果報告書，1979.
- 12) 杉山博信・野口正三：DAD 解析を通じての洪水比流量曲線の作成，ibid.
- 13) 田中礼次郎：山陰瀬戸内流域洪水比流量に関する研究，ibid.
- 14) 豊国永次：北四国地域の DAD 特性と洪水比流量曲線，ibid.
- 15) 河原田礼次郎：川内川流域の洪水比流量曲線について，第52回農業土木学会九州支部講演会要旨集，1978.
- 16) 日本河川協会編：建設省河川砂防技術基準（案）計画編，山海堂，1977.