

A Study on Regional Coefficient in Equation of Enveloping Curve for Regional Flood Peaks by Maximum Rainfall Data

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2019-03-22 キーワード (Ja): キーワード (En): Equation of enveloping curve for regional flood peaks, Maximum Envelope Curve of Specific Peak Discharges, Design flood discharge, Creager's equation, Group's equation, DAD analysis 作成者: 大西, 亮一, 加藤, 敬, 今泉, 眞之, 丹治, 肇, 松田, 周 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24514/00002058

〔農工報 43
23~34, 2004〕

最大雨量データによる洪水比流量包絡式地域係数の考察

大西亮一* 加藤 敬** 今泉眞之*** 丹治 肇**** 松田 周*****

目 次

I 緒言	23	IV 最大雨量データによる洪水比流量曲線	27
1 研究目的	23	1 雨量データによる洪水比流量曲線の計算法	27
2 研究の背景	23	2 日本最大雨量データによる洪水比流量曲線	28
II 洪水比流量包絡式	24	3 地域最大雨量データによる洪水比流量曲線	29
1 基礎式	24	V 米国最大雨量データによる洪水比流量曲線	30
2 曲線形状の比較	25	1 最大雨量のDD解析及びDAD解析	30
3 極値の検討	26	2 最大雨量データによる洪水比流量曲線	31
III 最大雨量データの解析	26	VI 最大雨量データから推定する地域係数	32
1 日本最大雨量のDD解析及びDAD解析	26	VII 結言	32
2 地域最大雨量データのDD解析	27	参考文献	33
		Summary	34

I 緒 言

1 研究目的

洪水吐はダムの重要構造物として、設計基準「ダム」（農水省，1981）では設計洪水流量は「A項流量」，「B項流量」，「C項流量」の中から最大値を採用するとなっている。この考えは合理的で異論ないが，流域面積が小さいダムでは，北海道を除いて，「C項流量」としてクリーガ式の値が採用され，「A項流量」「B項流量」「クリーガ式以外のC項流量」は洪水比流量の値が小さくなるため，ほとんど採用されていない。

このような関係から「クリーガ式の値が大き過ぎるのではないか」という声が聞かれるため，設計基準「ダム」（農水省，2003）ではクリーガ式の適用範囲を流域面積が20km²以上のダムとした。

一方，筆者らが事業誌等で設計洪水流量算定方法を確認すると，かんがい用ダムの設計段階では技術者によって「A項流量」，「B項流量」，「C項流量」がダム毎に厳密に検討され，最大値となるクリーガ式の値が設計

基準に従って採用されている。このような検討結果から「クリーガ式の値が大き過ぎるのではないか」という声が生まれていると考えられる。また，このような背景から角屋・永井（1979）は半理論的に洪水比流量包絡式を研究している。また，桑原（1988）は最大雨量を調査して，適切な設計洪水流量を考える基本的な考えを示している。しかし，洪水比流量と豪雨の関係を具体的に検討した事例は見あたらない。そこで，大西ら（2003）はクリーガ式と洪水比流量研究グループの提案式（以下「グループ式」という）の曲線形状に注目して適用限界を議論し，最大雨量のDAD（Depth, Area, Durationの略）解析で予測した流域面積1.0km²の値とクリーガ式及びグループ式で求めた流域面積1.0km²の値を比較して，両式的地域係数を考察している。このような研究結果等を踏まえて，設計基準「ダム」（農水省，2003）ではクリーガ式の適用範囲を示した。

これら検討結果から，北海道を除いて，「C項流量」としてクリーガ式を中小河川流域に適用すると過大な値になるのは，地域係数を決定した経緯に原因があるのであろうという検討結果を得たので報告する。

2 研究の背景

洪水流量の研究は数多く行われている（農業土木ハンドブック，1957）が，本研究では洪水比流量包絡式として紹介されているクリーガ式とグループ式を対象に適合性を考察する。Creager（1944）によって提案され，建設省土木研究所（1978）がメートル単位に換算して，係数を簡略化した式がクリーガ式として広く使われて

* 地域資源部

** 農地整備部首席研究官

*** 地域資源部地下水資源研究室

**** 水工部河海工水理研究室

***** 地域資源部水文水資源研究室

平成15年12月16日受理

キーワード：洪水比流量包絡式，洪水比流量曲線，設計洪水流量，クリーガ式，グループ式，DAD解析

いる(農水省, 2003; 水理公式集, 1999)。角屋・永井(1979)によって提案され, 角屋らの洪水比流量研究グループが適合性を研究したグループ式を農水省(2003)は洪水比流量研究グループ式として, 設計基準「ダム」で採用されている。大西ら(2003)はクリーガ式とグループ式の曲線形状に着目して, 極値から適用範囲を考察している。また, 雨量のDAD解析と合理式を用いて, 最大雨量から洪水比流量を求め, グループ式及びクリーガ式と比較検討して, 洪水流量の観測データが少ない小流域に対する適合性を考察している。

一方, ダムの洪水吐は異常な洪水流量を安全に流下させるため, 考えられる最大洪水流量で設計する必要がある。しかし, 洪水吐は全体の建設費に占める割合が大きいため, 経費削減対策として, 設計洪水流量の検討を求める声がある。

設計基準「ダム」(農水省, 1981)では, 設計洪水流量は「A項流量」, 「B項流量」, 「C項流量」の中から最大値を採用することになっているが, 流域面積が小さいダムでは, 北海道を除いて, 「C項流量」としてクリーガ式の値が採用され, 「A項流量」「B項流量」「C項流量の他の方法」は洪水比流量の値が小さくなるため, ほとんど採用されていない。また, ため池もダムの設計基準を準拠するため, クリーガ式を採用している。

これに対して, 農業工学研究所水文水資源研究室(1994)の調査では, 「流域面積が小さい場合にクリーガ式の値は大き過ぎる」という議論があった。また, 建設省土木研究所水資源開発研究室(1990)は流域面積20km²以下を小流域として, クリーガ式の代わりに雨量で検討する方法を示しているが, 検討結果として「クリーガ曲線を延長して適用した場合と降雨・流出関係式による方法と同様の結果が得られている。」となっており, まだ, あいまいさが残っている。砂田・木村(1991, 1993)によれば「流出解析結果とクリーガ式及びグループ式を比較して, 小流域ではほとんど同じである」となっているが, 比較に用いた図に問題がある。このような関係から, 筆者らは議論がまだ残っていると考えられる。

一方, 建設省土木研究所(1978)は確率日雨量の分布を調査するとともに, 可能最大日雨量を湿度補正法で推定している。この結果を見ると日雨量は地域的な偏りが見られるため, クリーガ式やグループ式の地域係数は雨量の地域分布と比較して検討しなければ, 「A項流量」, 「B項流量」, 「C項流量」の理念を反映できないのではないかと考えられる。

水理公式集(1999)では「クリーガ式の適用範囲は資料分布状態から流域面積10~2,000km²とされている」となっている。しかし, 灌漑用ダムでは, 10km²程度の流域面積が多いため, この適用範囲では新たな混乱の起こる心配がある。また, 小流域の洪水流量観測データは少ないので, その資料分布状態だけで, これ以上の検討は不可能であると考えられる。

このような背景から, 大西ら(2003)はクリーガ式及びグループ式の曲線形状から適用限界を議論するとともに, 洪水比流量の観測データの数が少ない流域面積の小さい範囲に対して, 桑原(1988)によって収集された最大雨量データを用いて, 雨量のDAD解析と合理式で洪水比流量を求め, クリーガ式及びグループ式を比較検討し, 地域係数の意味を考察している。

本報告はこれらの検討結果とともに, Creager(1944)が示した米国(USA; the United States of America)の洪水比流量データと桑原(1988)の最大雨量データをもちいた検討結果を示した。

この研究を進めるに当たり, 桑原英夫博士のご厚意により降雨データを使わせていただいた。永井明博士, 角屋陸博士, 豊田勝博士, 杉山博信博士から貴重な資料の提供と御指導を受けた。田中秀明氏が収集された資料の提供を受けた。ここに記して深く感謝の意を表します。

II 洪水比流量包絡式

1 基礎式

Creager(1944)によって提案され, 建設省土木研究所(1975)によって係数を簡略化されたクリーガ式は, 農水省(1981)の設計基準「ダム」では, 次式となっている。

$$q_c = CA^{\beta-1} \quad (1)$$

$$\beta = A^{0.05} \quad (2)$$

$$Q_c = q_c A = CA^{\beta} \quad (3)$$

ここに, q_c : クリーガ式の地域別既往最大洪水比流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$), A : 流域面積 (km^2), C : 地域係数, Q_c : クリーガ式の地域別既往最大洪水流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), である。また, クリーガ式は流域面積 A の指数 β が定数でなく, 式(2)のように流域面積 A の関数としたところに特徴がある。

グループ式は, 角屋・永井(1979)によって提案され, 農水省(1981)の設計基準「ダム」では, 次式となっている。

$$q_k = KA^{0.06} \exp(-0.04 A^{0.45}) \quad (4)$$

$$Q_k = q_k A = KA^{0.94} \exp(-0.04 A^{0.45}) \quad (5)$$

ここに, q_k : グループ式の地域別既往最大洪水比流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$), K : 地域係数, Q_k : グループ式の地域別既往最大洪水流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), である。

2 曲線形状の比較

クリーガ式とグループ式の基本的な曲線形状を比較するため、式(1)～式(5)の地域係数を $C=1.0$ 、 $K=1.0$ として、基本的な曲線の値を q_{CI} 、 Q_{CI} 、 q_{KI} 、 Q_{KI} とすれば、次のように書ける。

$$q_{CI} = A^{\beta-1} \quad (6)$$

$$Q_{CI} = q_{CI} A = A^{\beta} \quad (7)$$

$$q_{KI} = A^{-0.06} \exp(-0.04 A^{0.45}) \quad (8)$$

$$Q_{KI} = q_{KI} A = A^{0.94} \exp(-0.04 A^{0.45}) \quad (9)$$

ここに、 q_{CI} ：クリーガ式の地域係数 $C=1.0$ とした洪水比流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$)、 Q_{CI} ：クリーガ式の地域係数 $C=1.0$ とした洪水流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)、 q_{KI} ：グループ式の地域係数 $K=1.0$ とした洪水比流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$)、 Q_{KI} ：グループ式の地域係数 $K=1.0$ とした洪水流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)、である。

式(6)と式(8)を比較すれば、Fig.1のように、 $A=1.0\text{km}^2$ において $q_{CI}=1.0\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$ 、 $q_{KI}=0.96\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$ となって、両式はほぼ同じ値になる。しかし、 $A=1,000\sim 2,000\text{km}^2$ では、 $q_{CI}=0.133\sim 0.090\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$ 、 $q_{KI}=0.27\sim 0.19\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$ となって、式(8)の値が式(6)の値の約2倍になる。

式(7)と式(9)を比較すれば、Fig.2のように、 $A=1.0\text{km}^2$ において $Q_{CI}=1.0\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $Q_{KI}=0.96\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ となって、両式はほぼ同じ値になる。しかし、 $A=1,000\sim 2,000\text{km}^2$ では $Q_{CI}=133\sim 181\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $Q_{KI}=270\sim 373\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ となって、式(9)の値が式(7)の値の約2倍になる。

次に、流域面積が $A=1,000\sim 2,000\text{km}^2$ でクリーガ式とグループ式がほぼ同じ値になるように、 $C=2.05$ として、クリーガ式の曲線の値を q_{C2} 、 Q_{C2} とすれば、次のように書ける。

$$q_{C2} = 2.05A^{\beta-1} \quad (10)$$

$$Q_{C2} = 2.05 q_{C1} A = 2.05 A^{\beta} \quad (11)$$

ここに、 q_{C2} ：クリーガ式の地域係数 $C=2.05$ とした洪水比流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$)、 Q_{C2} ：クリーガ式の地域係数 $C=2.05$ とした洪水流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)、である。

式(10)と式(8)を比較すれば、 $A=1.0\text{km}^2$ において $q_{C2}=2.05\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$ 、 $q_{KI}=0.96\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$ となって、式(10)の値が式(8)の値の約2倍になる。しかし、 $A=1,000\sim 2,000\text{km}^2$ では $q_{C2}=0.27\sim 0.19\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$ 、 $q_{KI}=0.27\sim 0.19\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$ となり、 $A=1,178\text{km}^2$ において、両式の値は、 $q_{C2}=q_{KI}=0.2495\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$ となって等しくなり、Fig.1のように接点となる。

式(11)と式(9)を比較すれば、 $A=1.0\text{km}^2$ において $Q_{C2}=2.05\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $Q_{KI}=0.96\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ となって、式(11)の値が式(9)の値の約2倍になる。しかし、 $A=1,000\sim 2,000\text{km}^2$ では、 $Q_{C2}=273\sim 371\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $Q_{KI}=270\sim 373\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ となり、 $A=1,178\text{km}^2$ において、両式の値は、 $Q_{C2}=Q_{KI}=293.9\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ となって等しくなり、Fig.2のように接点となる。

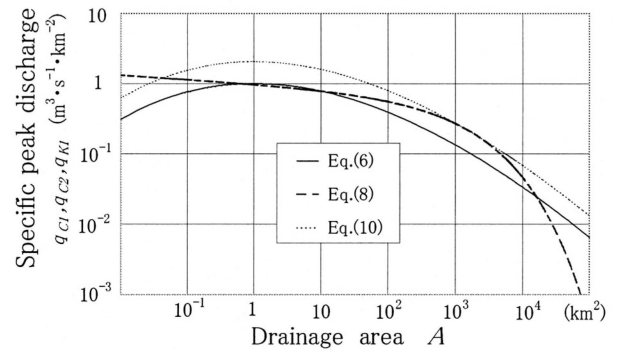


Fig.1 洪水比流量包絡式の基本的な形状の比較

Comparison with the curve profile for equation of enveloping curve for regional flood peaks

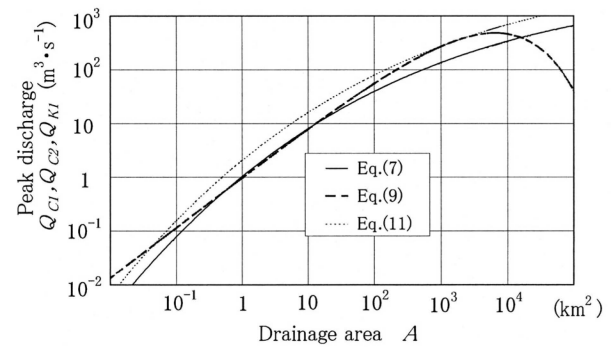


Fig.2 洪水流量の基本的な形状の比較

Comparison with the curve profile for flood peak discharge

以上の結果は、流域面積 $A=1,000\sim 2,000\text{km}^2$ 付近の観測洪水比流量に対して包絡線をひくと、両式の曲線は $A=1,178\text{km}^2$ 付近で接するようになり、 C の値は K の値の約2倍になることを意味する。また、建設省土木研究所(1975)がまとめた地域係数 C の値と角屋・永井(1979)が示した地域係数 K の値を比較すると、Table 1に示すように、紀伊南部地方と九州四国南部地方では、 C の値が K の値の2倍程度になっている。この C と K の値の違いは、両式の曲線形状の特性を示す結果と考える。

このような曲線形状の特性の違いから、流域面積の小さいダムが多い農業用ダムやため池の設計洪水流量はクリーガ式の値がグループ式の値よりも大きくなって採用されるため、「設計洪水流量が大き過ぎるのではない

か」という議論の一因となっていると考えられる。そこで、本文では流域面積 $A=1.0\sim 1,178\text{km}^2$ の範囲で、「小流域ではクリーガ式とグループ式のどちらの適合性がよいか」という視点で検討する。

この場合に、洪水比流量の正確な観測データで結論を出すことができれば問題はないが、流域面積が小さい観測点は数が少ないので、観測データの蓄積を待って結論を出すことは困難と考える。このため筆者らは、いろいろな視点でクリーガ式とグループ式を比較検討するのが良いと考え、本文では曲線形状に着目して極値を検討するとともに、流量観測データの少ない流域面積の小さい範囲に対して、雨量データによる考察を行った。

3 極値の検討

Fig.1の式(6)と式(10)の曲線を見ると、流域面積が $A=1.0\text{km}^2$ 付近で q_{C1} と q_{C2} の値が最大になる。そこで、式(1)と式(2)を流域面積 A で微分すると次のようになる。

$$\frac{dq_C}{dA} = C(\beta - 1)A^{\beta-2} \times \frac{d\beta}{dA} \quad (12)$$

$$\frac{d\beta}{dA} = 0.05 A^{-1.05} \quad (13)$$

よって、

$$\frac{dq_C}{dA} = C(A^{0.05} - 1)A^{\beta-2}(-0.05 A^{-1.05}) \quad (14)$$

$$\leq 0 \quad \text{であるためには}$$

$$A \geq 1.0 \quad (15)$$

となり、流域面積が $A=1.0\text{km}^2$ となる点で、洪水比流量 q_C は極値をもち、最大となる。このため、洪水比流量曲線の形状からクリーガ式の適用範囲は流域面積 A が 1.0km^2 よりも大きい範囲となる。実際は極値の近くは除くので、これよりも大きな流域面積が対象であると考えられる。

Fig.2の式(9)の曲線を見ると流域面積が $A=6,000\sim 7,000\text{km}^2$ 付近で Q_{K1} の値が最大になる。そこで、式(5)を流域面積 A で微分すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{dQ_K}{dA} &= 0.94K A^{-0.06} \exp(-0.04 A^{0.45}) \\ &+ K A^{0.94}(-0.04 \times 0.45) A^{-0.55} \exp(-0.04 A^{0.45}) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\frac{dQ_K}{dA} \geq 0 \quad \text{であるためには}$$

$$A \leq 6,568 \quad (17)$$

となり、流域面積が $A=6,568\text{km}^2$ となる点で、グループ式の洪水流量 Q_K は極値をもち、最大となる。このため、洪水流量曲線の形状からグループ式の適用範囲は流域面積 A が $6,568\text{km}^2$ よりも小さい範囲となる。実際は極値の近くは除くので、これよりも小さい流域面積が対象であると考えられる。

III 最大雨量データの解析

1 日本最大雨量のDD解析及びDAD解析

桑原(1988)によって収集された日本最大雨量の観測データを用いて、洪水比流量を求める。

Sherman型のDD (Depth, Durationの略)式は次のようになる。

$$P_0 = a t^m \quad (18)$$

DAD式は、Horton型のDA (Depth, Areaの略)式とSherman型のDD式から次のようになる。

$$P_A = P_0 \exp(-u t^v A^n) \quad (19)$$

ここに、 P_0 :地点最大雨量 (mm), P_A :最大面積雨量 (mm), t :降雨時間 (h), a, u, v, n, m :定数, である。

式(19)の両辺を P_0 で割り、 A の係数を α として整理すると次のようになる。

$$\frac{P_A}{P_0} = \exp(-\alpha A^n) \quad (20)$$

ここに、

$$\alpha = u t^v \quad (21)$$

である。式(20)から次のように書ける。

$$y = \alpha A^n = -\ln \left(\frac{P_A}{P_0} \right) \quad (22)$$

日本最大雨量データのDD解析結果をFig.3に示す。式(18)の m の値は0.5を用いることが多いが、Fig.3を見ると、24時間付近の雨量を通る平均的な雨量分布の線としては良いが、12時間付近の豪雨を通る線は $m=0.6$ が観測値に近いと言える。この結果から洪水比流量の検討には $m=0.6$ 及び $a=216$ を用いる。

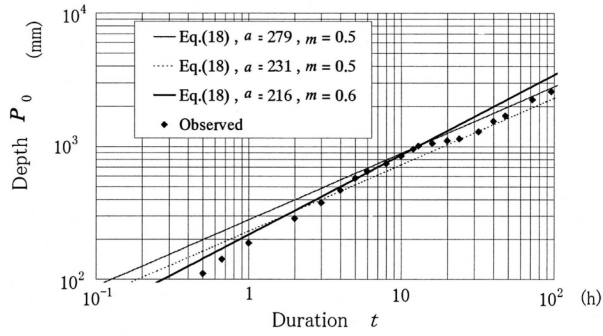


Fig.3 日本最大雨量のDD解析
DD analysis for maximum rainfall in Japan

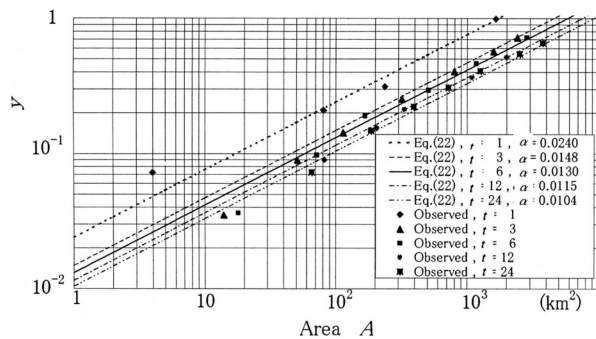


Fig.4 日本最大雨量のDAD解析
DAD analysis for maximum rainfall in Japan

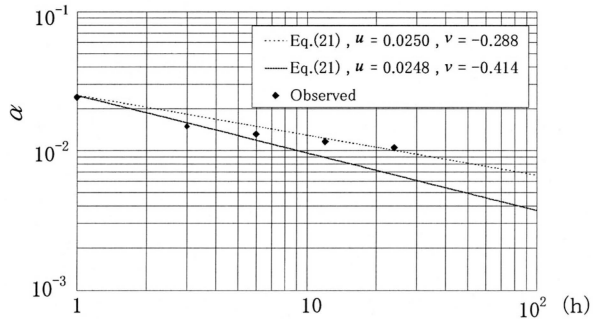


Fig.5 日本の α と時間 t の関係
Relation between duration t and α in Japan

日本最大雨量データのDAD解析結果をFig.4に示す。同じ時間長の観測データごとに、対応する勾配 $n = 0.5$ の平均的な線を引くと、式(22)の係数 α の値が求まる。このようにして求めた α の値は、Fig.5に示すように、下側の実線が式(21)の $u=0.0248, v = -0.414$ 、上側の点線が $u=0.0250, v = -0.288$ となる。洪水比流量の検討には、小流域への適用を考えて短時間の集中豪雨に対して適合性がよい下側の実線の値を用いる。

2 地域最大雨量データのDD解析

地域最大雨量データのDD解析結果をFig.6, 7に示す。これらの図からFig.3に示す日本最大雨量のDD解析結果と同じように、時間 t が小さい範囲では、式(18)は $m = 0.6$ がよく適合する。このため、地域最大雨量に対して、 $m = 0.6$ として、観測値に近いように a の値を求めた。

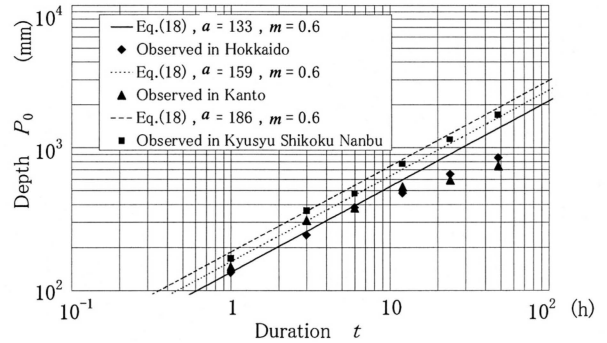


Fig.6 北海道、関東、九州四国南部地方の
最大雨量に対するDD解析
DD analysis for maximum rainfall in Hokkaido,
Kanto and Kyusyu Shikoku Nanbu

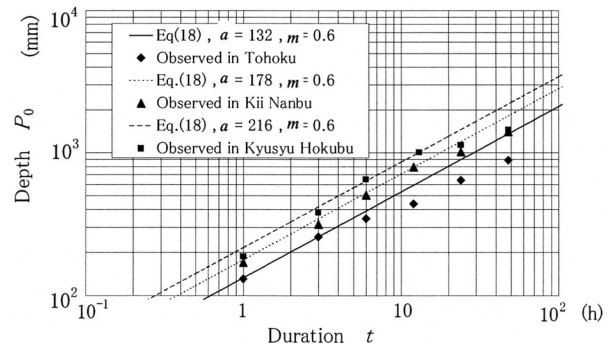


Fig.7 東北、紀伊南部、九州北部地方の
最大降雨量に対するDD解析
DD analysis for maximum rainfall in Tohoku,
Kii Nanbu and Kyusyu Hokubu

IV 最大雨量データによる洪水比流量曲線

1 雨量データによる洪水比流量曲線の計算法

ここでは、日本最大雨量データのDD解析結果及びDAD解析結果を用いて、洪水比流量曲線を求める。

降雨到達時間は、角屋・福島(1976)の式を用いると、次のようになる。

$$t_p = C_c A^{0.22} r_e^{-0.35} \quad (23)$$

比流量と雨量の関係は合理式から次のようになる。

$$q = \frac{r_e}{3.6} = \frac{fr}{3.6} \quad (24)$$

ここに、 t_p ：降雨到達時間 (h)， r_e ：有効降雨強度 (mm·h⁻¹)， q ：比流量 (m³·s⁻¹·km⁻²)， r ：降雨強度 (mm·h⁻¹)， C_c ：係数， f ：流出率，である。

式(23)と式(24)から降雨到達時間 t_p は次のように書ける。

$$t_p = \frac{C_c A^{0.22}}{(3.6q)^{0.35}} \quad (25)$$

よって、比流量 q は次のようになる。

$$q = \frac{C_c^{2.857} A^{0.629}}{3.6 t_p^{2.857}} \quad (26)$$

式(18)の地点最大雨量 P_0 と式(24)の降雨強度 r の関係は次のようになる。

$$r = \frac{P_0}{t} = at^{m-1} \quad (27)$$

式(27)及び式(18)と式(24)からDD解析結果を用いた洪水比流量 q_{DD} 及び洪水流量 Q_{DD} は次のようになる。

$$q_{DD} = \frac{fat^{m-1}}{3.6} \quad (28)$$

$$Q_{DD} = q_{DD} A = \frac{fat^{m-1} A}{3.6} \quad (29)$$

式(27)及び式(19)と式(24)からDAD解析結果を用いた洪水比流量 q_{DAD} 及び洪水流量 Q_{DAD} は次のようになる。

$$q_{DAD} = \frac{fat^{m-1}}{3.6} \exp(-u t^\nu A^n) \quad (30)$$

$$Q_{DAD} = q_{DAD} A = \frac{fat^{m-1} A}{3.6} \exp(-u t^\nu A^n) \quad (31)$$

2 日本最大雨量データによる洪水比流量曲線

ここで、日本最大雨量のDD解析結果から $a = 216$ ， $m = 0.6$ ，DAD解析結果から $u = 0.0248$ ， $\nu = -0.414$ ， $n = 0.5$ となる。また、流出係数 $f = 0.8$ ，到達時間係数 C_c は丘陵山林地域の290を用い、単位を時間 (h) にあわせると、 $C_c = (290 \div 60) = 4.833$ となる。これらの値を用いて、式(26)～式(31)を整理すると次のようになる。

$$q = 25.03 A^{0.629} t_p^{-2.857} \quad (32)$$

$$q_{DD} = 0.2222 a t^{-0.4} \quad (33)$$

$$Q_{DD} = q_{DD} A = 0.2222 a t^{-0.4} A \quad (34)$$

$$q_{DAD} = 0.2222 a t^{-0.4} \exp(-0.0248 t^{-0.414} A^{0.5}) \quad (35)$$

$$Q_{DAD} = q_{DAD} A = 0.2222 a t^{-0.4} A \exp(-0.0248 t^{-0.414} A^{0.5}) \quad (36)$$

これらの式の計算方法は、式(32)と式(33)から洪水比流量が $q_{DD} = q$ ，時間が $t_p = t$ として、流域面積 A に対する q_{DD} を計算すると、Fig.8に示す式(33)の線が求まる。この q_{DD} と A の値を用いて式(34)で Q_{DD} を求めると、Fig.9に示す式(34)の線となる。

次に式(32)と式(35)から洪水比流量が $q_{DAD} = q$ ，時間が $t_p = t$ となるように流域面積 A の値を繰り返し計算によって求めると、Fig.8に示す式(35)の曲線となる。この q_{DAD} と A の値を用いて式(36)で Q_{DAD} を求めると、Fig.9に示す式(36)の曲線となる。

これらの図でクリーガ式及びグループ式と比較するため、式(1)と式(4)に地域係数の最大値として、 $C = 84$ ， $K = 49$ を用いた洪水比流量の計算値をFig.8に示す。式(3)と式(5)を用いた洪水流量の計算値は、Fig.9に示すようになる。

Fig.8から、流域面積が $A = 1.0 \text{ km}^2$ となる点の洪水比流量は $q_{DD} = 53.4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ ， $q_{DAD} = 51.7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ となつて、グループ式の値 $q_K = 47.04 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ の方がクリーガ式の値 $q_C = 84 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ よりも近い値になる。また、Fig.8に示すように、グループ式(4)の曲線は、 $A \leq 1,178 \text{ km}^2$ では、式(35)の曲線とほぼ一致する。Fig.9に示す洪水流量についても、 $A \leq 1,178 \text{ km}^2$ では、グループ式(5)の曲線が式(36)の曲線とほぼ一致する。このため、グループ式の方がクリーガ式よりも適合性がよいことがわかる。

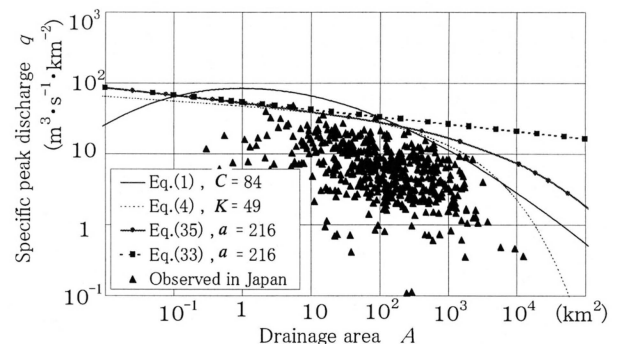


Fig.8 日本最大降雨による洪水比流量包絡式の検討
Examination for equation of enveloping curve for regional flood peaks with maximum rainfall in Japan

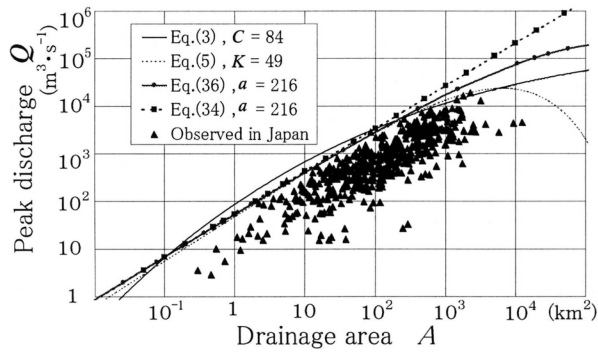


Fig.9 日本最大降雨による洪水流量の検討

Examination for flood peak discharge with maximum rainfall in Japan

観測洪水比流量の包絡線を考えると、Fig.8に示すように、 $A \leq 200 \text{ km}^2$ では、式(35)の曲線がほぼ一致する。観測洪水流量の包絡線を考えるとFig.9に示すように $A \leq 200 \text{ km}^2$ では、式(36)の曲線がほぼ一致する。この結果から $A \leq 200 \text{ km}^2$ では、日本最大雨量のDAD解析結果を用いた洪水比流量及び洪水流量は日本最大観測洪水比流量及び日本最大観測洪水流量の包絡線になっていると言える。また、この結果から $A \leq 200 \text{ km}^2$ では、日本最大雨量のDAD解析結果を用いた洪水比流量及び洪水流量はグループ式の値に近く、クリーガ式の値が離れるため、グループ式の適合性がよい。また、 $200 \text{ km}^2 < A \leq 10^4 \text{ km}^2$ では、クリーガ式の値がグループ式の値よりも小さくなる。また、 $200 \text{ km}^2 < A$ では、DAD解析結果を用いた値がグループ式の値やクリーガ式の値よりも大きくなり、流域面積が大きくなるほど観測洪水比流量や観測洪水流量から離れるので、最大雨量のDAD解析結果と合理式で求める洪水比流量及び洪水流量の適用限界が 200 km^2 程度と考えられる。

3 地域最大雨量データによる洪水比流量曲線

北海道地方、東北地方、関東地方、紀伊南部地方、九州北部地方、九州四国南部地方について、地域最大雨量データDD解析結果とFig.4、5に示す日本最大雨量データのDAD解析結果を用いて、式(35)と式(32)で洪水比流量を求めるとFig.10～15となる。ここで、DAD解析の α の値は、Fig.5に示す日本最大雨量の値である $u = 0.0248$ 、 $v = -0.414$ をもちいて計算する。また、Fig.10～15の観測洪水流量は建設省土木研究所(1975)がクリーガ式の地域係数 C の値を決めたデータを示している。グループ式の地域係数 K の値もこのデータで決められた(角屋・永井, 1979)。

北海道では、Fig.8に示す最大雨量のDD解析結果が $a = 133$ となるため、Fig.10に示す式(35)の曲線はクリーガ式及びグループ式の曲線よりもかなり大きな値になる。一方、北海道では、ダム設計洪水流量は確率雨量で求める A 項流量が多くなっているため、Fig.10に示す結果は

北海道の実情をよく示していると考ええる。

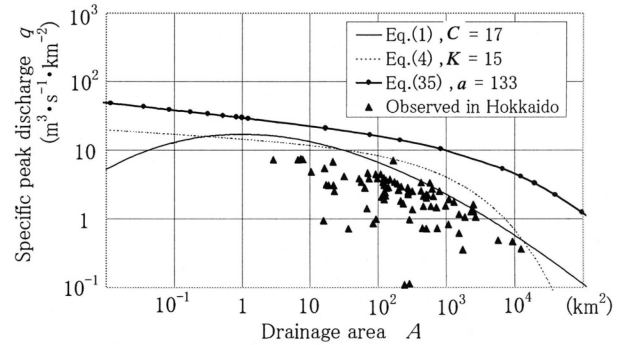


Fig.10 北海道最大降雨による洪水比流量曲線式の検討

Examination for equation of enveloping curve for regional flood peaks with maximum rainfall in Hokkaido

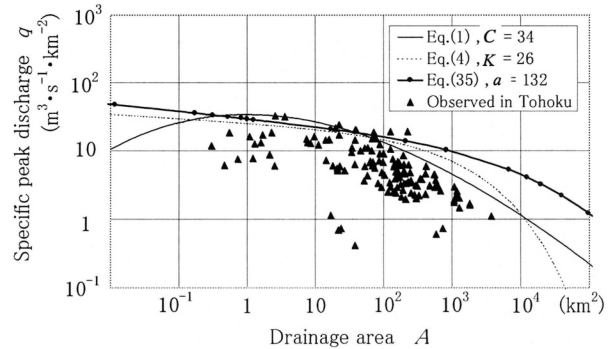


Fig.11 東北地方最大降雨による洪水比流量曲線式の検討

Examination for equation of enveloping curve for regional flood peaks with maximum rainfall in Tohoku

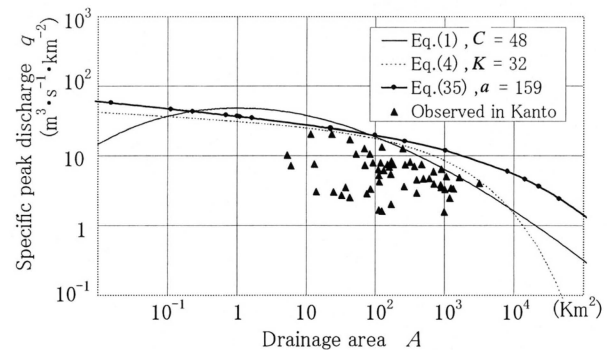


Fig.12 関東地方最大降雨による洪水比流量曲線式の検討

Examination for equation of enveloping curve for regional flood peaks with maximum rainfall in Kanto

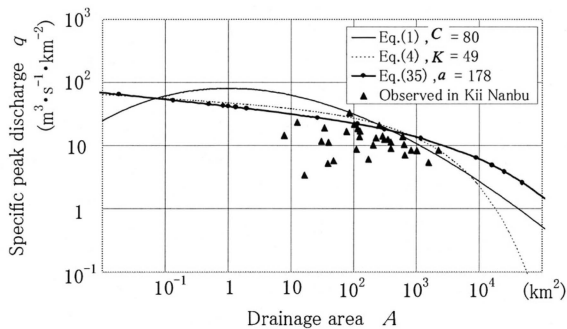


Fig.13 紀伊南部地方最大降雨による洪水比流量曲線式の検討
Examination for equation of enveloping curve for regional flood peaks with maximum rainfall in Kii Nanbu

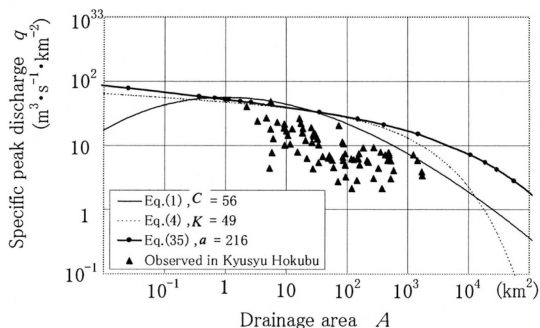


Fig.14 九州北部地方最大降雨による洪水比流量曲線式の検討
Examination for equation of enveloping curve for regional flood peaks with maximum rainfall in Kyusyu Hokubu

Fig.8, 9に示すように、東北地方では最大雨量のDD解析結果から $a = 132$ 、関東地方では $a = 159$ 、紀伊南部地方では $a = 178$ 、九州北部地方では $a = 216$ 、九州四国南部地方では $a = 186$ となる。これらの値をもちいて、Fig.11~15に示す式(35)の曲線を求めた。これらの図から流域面積が $A \leq 1,178 \text{ km}^2$ では、グループ式(4)の曲線の方がクリーガ式(1)の曲線よりも式(35)の曲線に近づき、グループ式の適合性が良いことがわかる。とくに、クリーガ式の地域係数 C の値がグループ式の地域係数 K の値の2倍程度である紀伊南部地方と九州四国南部地方では、グループ式の適合性が良いと言える。

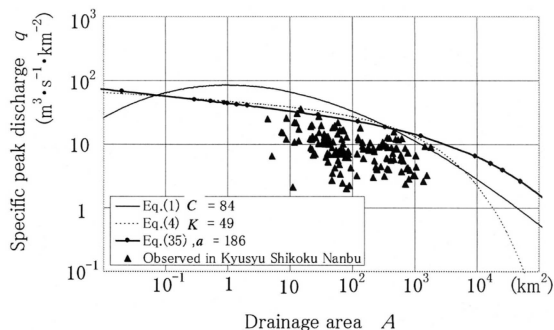


Fig.15 九州四国南部地方最大降雨による洪水比流量曲線式の検討

Examination for equation of enveloping curve for regional flood peaks with maximum rainfall in Kyusyu Shikoku Nanbu

Fig.11~15を個々に見ると観測洪水比流量に対して、Fig.11に示す東北地方とFig.12に示す関東地方では $A \leq 100 \text{ km}^2$ で式(35)の曲線が包絡線になっている。Fig.13に示す紀伊南部地方とFig.15に示す九州四国南部地方では $A \leq 400 \text{ km}^2$ で式(35)の曲線が包絡線になり、グループ式の値とともに適合性がよい。Fig.14に示す九州北部地方では日本最大雨量データとなり、観測洪水比流量が東北地方、関東地方、紀伊南部地方、九州四国南部地方に比べて少し小さくなっているが、 $A \leq 30 \text{ km}^2$ で式(35)の曲線がほぼ包絡線になっている。流域面積 A がこれより大きくなると式(35)の曲線が観測洪水比流量よりも大きくなり、適合性が悪くなるため、地域最大雨量データのDAD解析結果を用いて求めた洪水比流量の適用限界は、東北地方と関東地方が $A \leq 100 \text{ km}^2$ の範囲、紀伊南部地方と九州四国南部地方が $A \leq 400 \text{ km}^2$ の範囲、九州北部地方が $A \leq 30 \text{ km}^2$ の範囲と考えられる。

V 米国最大雨量データによる洪水比流量曲線

1 最大雨量のDD解析及びDAD解析

桑原(1988)の米国最大雨量データを用いてDD解析を行うとFig.16に示すようになる。この図から式(18)の m の値は1分~5時間降雨強度を通る線が $m=0.6$ となる。このため洪水比流量の検討には $m=0.6$ 及び $a=317$ を用いる。

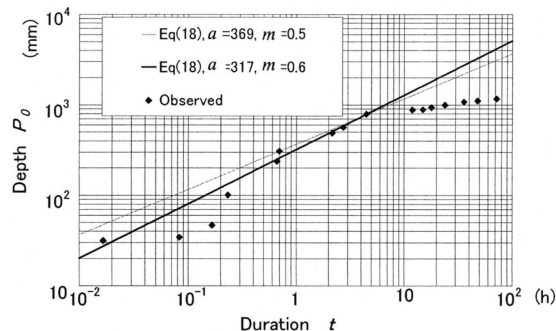


Fig.16 米国最大雨量のDD解析

DD analysis for maximum rainfall in USA

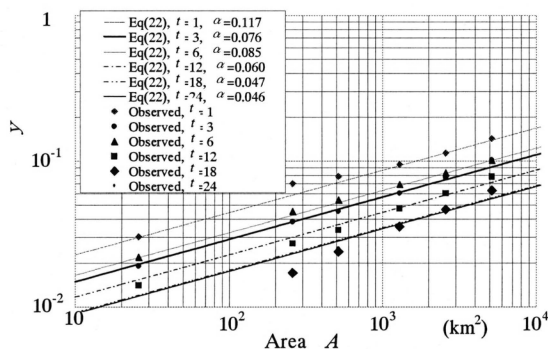


Fig.17 米国最大雨量のDAD解析

DAD analysis for maximum rainfall in USA

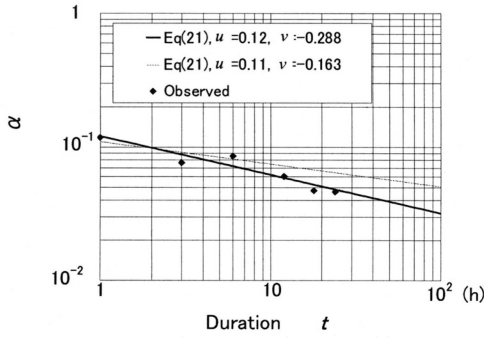


Fig.18 米国の α と時間 t の関係

Relation between duration t and α in USA

米国最大雨量データのDAD解析結果をFig.17に示す。同じ時間長の観測データごとに、対応する勾配 $n=0.29$ の平均的な線を引くと、式(22)の係数 α の値が求まる。このようにして求めた α の値は、Fig.18に示すように、下側の実線が式(21)の $u=0.12$, $v=-0.288$ となる。これに対して桑原(1988)は上側の点線の $u=0.11$, $v=-0.163$ を用いている。洪水比流量の検討には、全体的に適合性がよい下側の実線の $u=0.12$, $v=-0.288$ を用いる。

2 最大雨量データによる洪水比流量曲線

米国最大雨量のDD解析結果はFig.16から $a=216$, $m=0.6$ となる。また、DAD解析結果はFig.17, 18から $u=0.0248$, $v=-0.414$, $n=0.29$ となる。次に、流出係数 $f=0.8$ 、到達時間係数 C_c は丘陵山林地域の290を用い、単位を時間(h)にあわせると、 $C_c=(290 \div 60)=4.833$ となる。これらの値を用いて、式(26)~式(31)を整理すると次のようになる。

$$q = 25.03 A^{0.629} t_p^{-2.857} \quad (37)$$

$$q_{DD} = 0.2222 a t^{-0.4} \quad (38)$$

$$Q_{DD} = q_{DD} A = 0.2222 a t^{-0.4} A \quad (39)$$

$$q_{DAD} = 0.2222 a t^{-0.4} \exp(-0.0248 t^{-0.414} A^{0.29}) \quad (40)$$

$$Q_{DAD} = q_{DAD} A = 0.2222 a t^{-0.4} A \exp(-0.0248 t^{-0.414} A^{0.29}) \quad (41)$$

これらの式の計算は、式(37)と式(38)から洪水比流量が $q_{DD}=q$ 、時間が $t_p=t$ として、流域面積 A に対する q_{DD} を計算すると、Fig.19に示す式(38)の線が求まる。この q_{DD} と A の値を用いて式(39)で Q_{DD} を求めると、Fig.20に示す式(39)の線となる。

次に式(37)と式(40)から洪水比流量が $q_{DAD}=q$ 、時間が $t_p=t$ となるように流域面積 A の値を繰り返し計算によって求めると、Fig.19に示す式(40)の曲線となる。

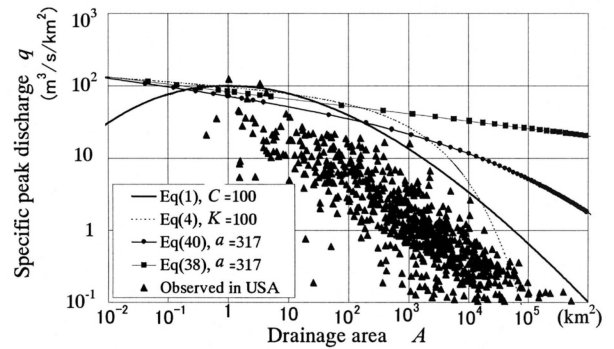


Fig.19 米国最大降雨による洪水比流量包絡式の検討

Examination for equation of enveloping curve for regional flood peaks with maximum rainfall in USA

この q_{DAD} と A の値を用いて式(41)で Q_{DAD} を求めると、Fig.20に示す式(41)の曲線となる。

Fig.19, 20に示す観測洪水比流量、観測洪水流量はCreager (1944)によって示された値である。流域面積が $A=1.0 \sim 10.0 \text{ km}^2$ の観測値を通るようにクリーガ式及びグループ式の地域係数を決めると、 $C=100$, $K=100$ となり、Fig.19に示す式(1), 式(4)の曲線及びFig.20に示す式(3), 式(5)の曲線となる。

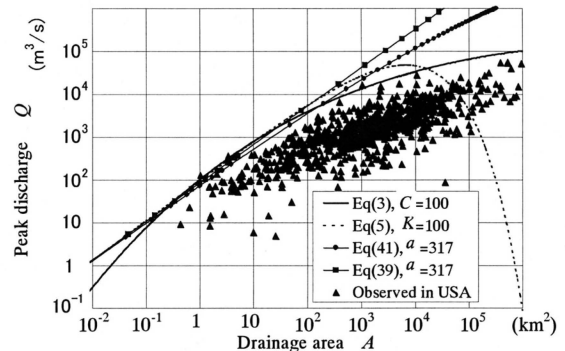


Fig.20 米国最大降雨による洪水流量の検討

Examination for flood peak discharge with maximum rainfall in USA

Fig.19から流域面積が $A=1.0 \text{ km}^2$ となる点の洪水比流量は $q_{DD}=83.4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, $q_{DAD}=71.4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ となって、グループ式の値 $q_K=96.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ の方がクリーガ式の値 $q_C=100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ よりわずかに近くなる。

桑原(1988)はCreager (1944)の観測洪水比流量よりも新たなデータを追加して示し、最大雨量データのDAD解析で求めた洪水比流量と比較し、適合性がよいと言っているが、Fig.19から最大雨量データのDAD解析で求めた洪水比流量は流域面積が $A=1.0 \sim 10.0 \text{ km}^2$ の観測洪水比流量の包絡線よりも小さくなるのがわかる。

VI 最大雨量データから推定する地域係数

小流域に適した地域係数 C 、 K の値を検討するために、雨量のDAD解析と合理式を用いて、地域最大雨量から流域面積 $A=1.0\text{km}^2$ となる点で、洪水比流量 $q_{DAD}(1.0\text{km}^2)$ を求め、この値を用いて、 $q_{DAD}(1.0\text{km}^2) = (1.0 \times C')$ 、 $q_{DAD}(1.0\text{km}^2) = (0.96 \times K')$ となるように係数 C' 、 K' を計算した。これらをTable 1に示す。

また、流域面積 $A=1.0\text{km}^2$ となる点で、洪水比流量を比較するために、クリーガ式及びグループ式の洪水比流量、 $q_C(1.0\text{km}^2) = (1.0 \times C)$ 、 $q_K(1.0\text{km}^2) = (0.96 \times K)$ を計算するとTable 1に示すようになる。

Table 1から、流域面積 $A=1.0\text{km}^2$ となる点で、 $q_{DAD}(1.0\text{km}^2)$ と $q_C(1.0\text{km}^2)$ 及び $q_K(1.0\text{km}^2)$ を比較すると、紀伊南部地方と九州四国南部地方では、 $q_K(1.0\text{km}^2)$ が $q_C(1.0\text{km}^2)$ よりも $q_{DAD}(1.0\text{km}^2)$ に近い値になることがわかる。つぎに、地域係数 C の値は係数 C' と比べると大きい、 K の値は K' に近いことがわかる。これらの結果から流域面積 $A=1.0\text{km}^2$ となる点では、グループ式の方がクリーガ式より適合性がよいと言える。また、地域最大雨量から求めた係数 C' 、 K' は、流域面積 $A=1.0\text{km}^2$ となる点に対して適合するように、地域最大雨量から求めたクリーガ式とグループ式の地域係数と言えるので、この方法は小流域に対する地域係数の検討に有効と考えられる。

Table 1 流域面積 1.0km^2 の洪水比流量($\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^2$)

(()内は C 、 K 、 C' 、 K' の値)

Specific flood peak discharge for drainage area 1.0km^2 ($\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^2$)

((); Value of C , K , C' , K')

Method Regional	Creager's method $q_C(1.0\text{km}^2)$ (C value)	Group's method $q_K(1.0\text{km}^2)$ (K value)	DAD analysis $q_{DAD}(1.0\text{km}^2)$ (C', K' value)
Hokkaido	17 (17)	14 (15)	29 (29, 30)
Tohoku	34 (34)	25 (26)	29 (29, 30)
Kanto	48 (48)	31 (32)	36 (36, 38)
Kii Nanbu	80 (80)	47 (49)	41 (41, 43)
Kyusyu Hokubu	56 (56)	47 (49)	52 (52, 54)
Kyusyu Shikoku Nanbu	84 (84)	47 (49)	43 (43, 45)
All Japan	84 (84)	47 (49)	52 (52, 54)
USA	100 (100)	100 (96)	71 (71, 74)

また、Table 1から、流域面積 $A=1.0\text{km}^2$ となる点で、日本最大雨量に対する $q_{DAD}(1.0\text{km}^2)$ と $q_C(1.0\text{km}^2)$ 及び $q_K(1.0\text{km}^2)$ を見ると九州北部地方と同じ値になることがわかる。これは、この地方の最大雨量データが日本最大雨量データになっているためである。

米国最大雨量に対する $q_{DAD}(1.0\text{km}^2)$ と $q_C(1.0\text{km}^2)$ 及び $q_K(1.0\text{km}^2)$ を見るとかなり差があるが、雨量の観測場所と洪水流量の観測場所をもう少し検討する必要があると考えている。

VII 結 言

洪水比流量包絡式の曲線形状から、クリーガ式は、流域面積が $A=1.0\text{km}^2$ となる点で、洪水比流量が極値をもち、最大値となる。このため、クリーガ式の適用範囲は流域面積 A が 1.0km^2 よりも大きい範囲となる。グループ式は流域面積が $A=6,568\text{km}^2$ となる点で、洪水流量が極値をもち、最大値となる。このため、グループ式の適用範囲は流域面積 A が $6,568\text{km}^2$ よりも小さい範囲となる。

つぎに、式(8)と式(10)は、流域面積が $A=1,178\text{km}^2$ となる点で、 $q_{C2}=q_{K1}=0.2495\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$ となって等しくなり、接点となる。このため筆者らは、流域面積が $A=1.0 \sim 1,178\text{km}^2$ の範囲に対して、クリーガ式とグループ式の適合性を検討した。

流域面積が $A \leq 1,178\text{km}^2$ では、地域係数の最大値を用いたグループ式の q_K の曲線の方がクリーガ式の q_C の曲線よりも日本最大雨量から求めた洪水比流量の q_{DAD} の曲線に近づき、グループ式の適合性がよいことを示した。また、北海道では、地域最大雨量から求めた洪水比流量の q_{DAD} の値に対して、クリーガ式の q_C 及びグループ式の q_K の値がかなり小さくなり、両式の適合性は悪い。しかし、他の地域では、流域面積が $A \leq 1,178\text{km}^2$ の範囲で、グループ式の洪水比流量曲線の方がクリーガ式の洪水比流量曲線よりも地域最大雨量から求めた洪水比流量曲線に近づき、グループ式の適合性がよいことを明らかにした。

また、紀伊南部地方と九州四国南部地方では、Table 1に示すように、流域面積 1.0km^2 となる点において、グループ式の $q_K(1.0\text{km}^2)$ の方がクリーガ式の $q_C(1.0\text{km}^2)$ よりも地域最大雨量から求めた洪水比流量 $q_{DAD}(1.0\text{km}^2)$ に近い値となり、グループ式の適合性がよいことを示した。また、地域最大雨量から求めた係数 C' 、 K' は、流域面積 $A=1.0\text{km}^2$ となる点に対して、地域最大雨量から求めた地域係数となるので、小流域に対して、地域係数を検討する場合に地域最大雨量を考慮することが有効な方法であることを明らかにした。

このような検討結果から、北海道を除いて、流域面積が小さい範囲では、地域最大雨量データのDAD解析結果から求めた洪水比流量はその地域の観測洪水比流量の包絡線となることが明らかになった。このため、クリー

ガ式及びグループ式で求める洪水比流量は地域係数を決めた地域の最大値を計算することになると言える。この場合に、クリーガ式及びグループ式は曲線形状から適用限界を持っていることを考慮する必要がある。

また、設計基準「ダム」(2003)で示された「A項流量」, 「B項流量」, 「C項流量」から最大値を設計洪水流量とするという基本的な考えからすると、クリーガ式及びグループ式での計算結果は地域係数 C , K を決めた地域の最大値を求めることを意味する。このため、「A項流量」や「C項流量」の確率雨量や最大雨量の計算に用いるデータは地域係数 C , K を決めた地域全体を対象にする必要があることを示している。

さらに、米国最大雨量データのDAD解析結果を用いた洪水比流量は観測洪水比流量データの包絡線になると言える段階ではないことがわかった。

参考文献

- Creager, W.P., Justin, J.D. and Hinds, J. (1944) : Eng. for Dams, Vol.1, John Wiley & Sons, Inc., p.99-131
- 角屋 睦・福島 晟 (1976) : 中小河川の洪水到達時間, 京大防災研年報第19号B-2, p.143-152
- 角屋 睦・永井明博 (1979) : 洪水比流量曲線へのアプローチ, 京大防災研年報22号B-2, p.195-208
- 建設省土木研 (1976) : 全国ダム地点地域別比流量図 (1975年), 土木研資料, 第1093号, p.1-63
- 建設省土木研 (1978) : 日本の主要地点における可能最大日雨量 (湿度補正法による推定結果), 土木研資料, 第1398号, p.1-57
- 建設省土木研究所水資源開発研究室 (1990) : 小流域のダムの設計洪水流量の検討について, ダム技術, No.48, p.79-80
- 桑原英夫 (1988) : 日本における最大級豪雨の時間的空間的集中特性に関する実証的研究, 東大学位論文p.1-173
- 農業工学研究所水文水資源研究室 (1994) : 農業用ダム設計洪水流量の問題点, 平成5年度依頼研究報告書, p.1-84
- 農業土木ハンドブック (1957) : 農土学会, p.91-93
- 農林水産省 (1981) : 設計基準, 「設計ダム」, 農土学会, p.79-84
- 農林水産省 (2003) : 設計基準, 「設計ダム」, 農土学会, p.79-84
- 大西亮一・松田 周・中西憲雄・高木 東 (1999) : 洪水比流量曲線式に対する考察 (クリーガ式及び洪水比流量グループ式の比較), 農土講演集, p.120-121
- 大西亮一・加藤 敬・今泉眞之・丹治 肇 (2003) : 最大降雨量データによる洪水比流量包絡式適合性の考察, 農土論集, No.225 (Vol.71, No.3), p.85-93
- 水理公式集 (昭和60年版) (1985) : 土木学会, p.156-157
- 水理公式集 (平成12年版) (2000) : 土木学会, p.156-157
- 砂田憲吾・木村真章 (1991) : 水文学評価のための最適空間スケールに関する基礎的研究, 水工学論第35号, p.675-678
- K.SUNADA (1993) : A study of scale effects on the estimation of maximum direct runoff rates using a catchment model, IAHS Publication No.212, p.289-297

A Study on Regional Coefficient in Equation of Enveloping Curve for Regional Flood Peaks by Maximum Rainfall Data

OHNISHI Ryouichi , KATO Takashi, IMAIZUMI Masayuki, TANJI Hajime and MATSUDA Shuh

Summary

In this paper, Creager's equation and Group's equation are algebraically examined to determine an equation of an enveloping curve for regional flood peaks from the viewpoint of the curve profile. The applicability of a small drainage area with little observed data on flood peak discharge was examined in comparison to specific flood peak discharge calculated by a rational formula using data of maximum rainfall. In the algebraical consideration, the Creager's equation had an extreme value at a drainage area $A=1.0 \text{ km}^2$, and the specific flood peak discharge became a maximum. Flood peak discharge calculated by Group's equation had an extreme value at a drainage area $A=6,568 \text{ km}^2$, and it became a maximum. In about $1,178 \text{ km}^2$ or less, the value and curve profile of Group's equation using a maximum value of the local coefficient approximated the specific flood peak discharge calculated by the rational formula using the maximum rainfall data from Japan. Except for Hokkaido, the specific flood peak discharge calculated by the rational formula using local data of maximum rainfall considerably approximated the value and curve profile of Group's equation at about $1,178 \text{ km}^2$ or less. From the above research results, the Group's equation is applicability better than the Creager's equation, as the drainage area A is $1,178 \text{ km}^2$ or less .

Key word: Equation of enveloping curve for regional flood peaks, Maximum Envelope Curve of Specific Peak Discharges, Design flood discharge, Creager's equation, Group's equation, DAD analysis