

合理式による洪水ピーク流量の算定 Estimation of Flood Peak Discharge Using Rational Formula

早稲田大学理工学部 鮎 川 登
国士館大学工学部 北 川 善 廣
早稲田大学大学院 鎌 田 光

1. 序

水文データの整備されていない河川の洪水ピーク流量の算定や基本高水の決定には合理式が用いられることが多い。合理式により洪水ピーク流量を算定するためには洪水到達時間と流出係数の値を決定することが必要である。本論文では流出係数に関して検討した結果について述べる。

2. 合理式

合理式による洪水ピーク流量の算定は次式によって行なわれる。

$$Q_p = \frac{1}{3.6} f_p r A \quad (1)$$

ここで、 Q_p は洪水ピーク流量 (m^3/sec)、 f_p は流出係数、 r は洪水到達時間内の平均降雨強度 (mm/hr)、 A は流域面積 (km^2) である。

(1)式により洪水ピーク流量を算定するためには洪水到達時間内平均降雨強度と流出係数の値を決定することが必要である。洪水到達時間内平均降雨強度は洪水到達時間を推定し、降雨ハイトグラフから算出する。

洪水到達時間に関してはいろいろ検討されており、洪水到達時間の推定式として Rziha の式、Kraven の式、建設省土木研究所の式、角屋らの式などが提案されており、また降雨ハイトグラフと流量ハイドログラフから洪水到達時間を推定する方法として降雨ピークの発生時刻から流量ピークの発生時刻までの時間（流出の遅れ時間）の2倍とする方法や石原・高棹の方法などが提案されている^{1), 2)}。

流出係数については物部が与えた値が参照されている¹⁾。

全国各地の流出試験地における観測データに基づいた洪水到達時間および流出係数の検討が建設省土木研究所を中心として行なわれたが³⁾、算出された値はばらつきが大きく、洪水到達時間および流出係数の値を推定する方法を確立するには至らなかった。

ある流域について雨量と流量の観測データを用いて算出された流出係数の値がばらつくことの原因としては観測誤差や洪水到達時間の決め方のほかに降雨の時間的および空間的な分布の非一様性や先行降雨の影響などが考えられる。

合理式は洪水到達時間以上の時間にわたって一定降雨強度の雨が流域全体に一樣に降り続く場合を想定して導かれた式である。実際の降雨は時間的にも場所的にも変化するので、合理式は前提とは異なる条件に対して適用されることになる。また、ピーク流量には洪水到達時間以前の降雨による流量も含まれているために、ピーク流量と雨量の観測データを用いて算出された流出係数の値には先行降雨の影響が含まれることになる⁴⁾。これらのことが流出係数の値がばらつくことの原因になっているものと思われる。

以下では、合理式の前提条件にできるだけ近づけるようなしかたで合理式を適用する方法を考え、その方法に基づいて雨量と流量の観測データを用いて流出係数を算出し、流出係数の特性に関して考察する。

3. 合理式による洪水ピーク流量の算定法

合理式は降雨の時間的および空間的な分布の一様性を仮定しているので、小さい流域に適用するのが望ましいと考え、流域をいくつかの小流域に分割し、各小流域ごとに合理式を適用して流出量を計算し、それら

を合流させて流量算定地点におけるピーク流量を算定することを試みる。すなわち、流域を尾根線と河道によって、図1に示すように、小流域に分割し、流量算定地点のピーク流量に寄与する各小流域からの流出量を合理式により求め、それらの和として流量算定地点のピーク流量を算定することを試みる。

各小流域からの流出量を合理式により算定するためには、各小流域の洪水到達時間を求め、洪水到達時間内の平均降雨強度を求めることが必要である。

小流域の洪水到達時間は小流域斜面の最上端に降った雨水により雨水流に与えられた擾乱が流域斜面を伝播し、支川河道に達するのに要する時間（流出時間：集中時間）と支川の最上流端に流出した雨水により洪水流に与えられた擾乱が河道を伝播し、本川合流点に達するのに要する時間（流下時間）の和として算定する。すなわち、

$$t_p = t_c + t_f \quad (2)$$

ここで、 t_p は小流域の洪水到達時間、 t_c は流出時間（集中時間）、 t_f は流下時間である。

流出時間 t_c はManningの式を用いた地表流のkinematic wave理論による次式により計算する。

$$t_c = (L / \alpha R e^{2/3})^{3/5} \quad (3)$$

ここで、 L は流域斜面長、 $\alpha = \sqrt{\sin \theta} / N$ 、 θ は流域斜面の傾斜角、 N は流域斜面の等価粗度、 Re は洪水到達時間内平均有効降雨強度である。 Re は $Re = f \cdot r$ として求める。 f は流出係数、 r は洪水到達時間内平均降雨強度である。

流下時間 t_f はManningの式を用いた洪水流のkinematic wave理論による洪水流の伝播速度 w を用いて計算する。

$$t_f = \frac{l}{w} \quad ; \quad w = \frac{5}{3} v \quad ; \quad v = \frac{Q}{Af} = \frac{1}{n} R^{2/3} i^{1/2} \quad (4)$$

ここで、 l は河道長、 v は平均流速、 Q は流量、 Af は流水断面積、 n はManningの粗度係数、 R は径深、 i は河床勾配である。流域斜面からの流出が河道に沿って一様に生ずる場合の流下時間と等しい流下時間となる流量は支川への全流出量 Q_t の約0.28倍となるので、平均流速 v を算定するための流量 Q は $Q = 0.25 Q_t$ とする。

小流域の洪水到達時間内の平均降雨強度は流量算定地点のピーク流量に寄与する、上流から本川を流下してくる流量と小流域からの流出量が同時刻に合流するように時刻を設定し、その時刻から小流域の洪水到達時間だけさかのぼる時間内の雨量を降雨ハイレログラフから求め、それを洪水到達時間で除すことによって求める（図2）。

小流域からの流出量は合理式により計算する。

$$Q_s = \frac{1}{3.6} f r_s A_s \quad (5)$$

ここで、 Q_s は小流域からの流出量（ m^3/sec ）、 f は流出係数、 r_s は小流域の洪水到達時間内の平均降雨強度（ mm/hr ）、 A_s は小流域の流域面積（ km^2 ）である。

なお、小流域からの流出量の計算はピーク流量を求めるのではなく、流量算定地点のピーク流量に寄与する流出量を求めることになるので、流出係数はピーク流量を求めるた

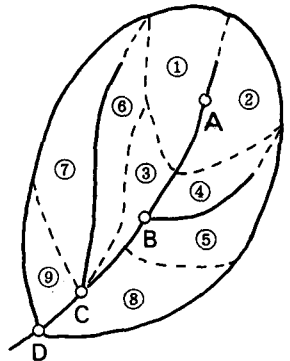
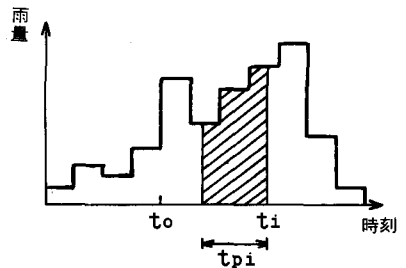


図1 流域分割



$$r_i = (\text{斜線部の雨量}) / t_{pi}$$

- r_i : i 番目の小流域の洪水到達時間内平均降雨強度
- t_{pi} : i 番目の小流域の洪水到達時間
- t_0 : 計算開始時刻
- t_i : 時刻 t_0 に上流端に降った雨水の影響が i 番目の小流域の本川流出点に到達する時刻

図2 小流域の洪水到達時間内平均降雨強度の計算の説明図

めの流出係数 f_p と区別して f とした。

河川の所定の流量算定地点における流量は、計算開始時刻を設定し、各小流域の洪水到達時間内の平均降雨強度を求め、合理式により各小流域からの流出量を計算し、それらの流出量の和をとることによって求める。このようにして計算される流量算定地点の流量は計算開始時刻のとり方によって異なる。そこで、計算開始時刻をずらして上記の計算を行ない、流量算定地点の流量を計算し、それらのうちの最大のものをその地点のピーク流量とする。

上述した合理式によるピーク流量の算定法の計算手順は次のようになる。

- (1)流域を尾根線および河道により小流域に分割し、小流域の面積を求める。
- (2)小流域内小支川の内容を考慮して小流域を長方形斜面で置換え、斜面長と斜面勾配を求める。
- (3)各小流域の洪水到達時間内の平均降雨強度を仮定し、各小流域の流出時間（集中時間） t_c を(3)式により計算する。
- (4)(3)で仮定した洪水到達時間内平均降雨強度を用いて(5)式により各小流域からの流出量 Q_s を計算する。
- (5)(4)で計算した各小流域からの流出量を用いて(4)式により各小流域の流下時間 t_f を計算する。
- (6)(4)および(5)で求めた流出時間 t_c と流下時間 t_f の和として各小流域の洪水到達時間 t_p を求める。
- (7)降雨ハイトグラフの計算開始時刻 t_0 を仮定し、最上流の流量点Aに流出する小流域からの流出量を求める。まず、小流域①について降雨ハイトグラフから時刻 t_0 と $t_0 + t_{p1}$ の間の平均降雨強度を求め、(5)式により小流域①からの流出量 Q_{s1} を計算する。つぎに、他の小流域①（ $i = 2, \dots, N1 : N1$ は流量点Aに流出する小流域の数）について、それぞれの降雨ハイトグラフから時刻 t_0 と $t_0 + t_{p1} - t_{pi}$ の間の平均降雨強度を求め、(5)式により流出量 Q_{si} を計算する。そして、それらの流出量の和として流量点Aの流量 Q_1 を求める。
- (8)流量 Q_1 が一つ下流の流量点Bまで伝播するのに要する時間 T_{f1} をManningの式を用いた洪水流のkinematic wave理論による伝播速度で流量点AからBまでの河道区間長を除くことによって求める。
- (9)流量点Bに流出する小流域①（ $i = N1 + 1, \dots, N1 + N2 : N2$ は流量点Bに流出する小流域の数）について、それぞれの降雨ハイトグラフから時刻 $t_0 + t_{p1} + T_{f1} - t_{pi}$ と $t_0 + t_{p1} + T_{f1}$ の間の平均降雨強度を求め、(5)式により流出量 Q_{si} を計算する。それらの流出量の和として流量点Bへの流出量 Q_2 を求める。
- (10)流量 $Q_1 + Q_2$ がつぎの流量点Cまで伝播するのに要する時間 T_{f2} を、(8)と同様に、計算する。
- (11)以下、順次計算を進め、所定の流量算定地点における流量 Q を求める。
- (12)以上のようにして求められる流量 Q は(3)で仮定した洪水到達時間内平均降雨強度により計算された洪水到達時間に基づくもので、第一次近似解である。(7)以降の計算過程で求められる各小流域の洪水到達時間内平均降雨強度を用いて(3)以降の計算を行ない、この計算を所定の流量算定地点の流量の計算値が一定になるまで繰り返す。
- (13)降雨ハイトグラフの計算開始時刻 t_0 を変えて上記の計算を行ない、流量算定地点の流量を求め、それらのうちから最大の流量を求め、流量算定地点のピーク流量とする。

4. 流出係数に関する考察

ある山地河川の流域面積254 km^2 の地点における流量の観測データと流域内の6地点における雨量データに基づいてこの流域の流出係数の特性について考察する。

洪水到達時間を流出の遅れ時間の2倍とし、流域平均雨量のハイトグラフから洪水到達時間内の平均降雨強度を求め、ピーク流量の観測値とから(1)式により流出係数を算定し、ピーク流出高との関係を示すと、図3ようになる。図中の番号は洪水の発生年月日順につけた洪水番号を表わす。図3によると、流出係数の値はかなりばらつくことがわかる。

流域を尾根線と河道により、図4に示すように、面積3.4～18.5 km^2 の24の小流域に分割し、本論文で提

案した合理式によるピーク流量の算定法に基づいて流出係数を算定する。この算定法にはパラメーターとして流域斜面の等価粗度および本川と支川の河道の粗度係数が含まれているが、ここでは、流域斜面の等価粗度は0.7とし、河道の粗度係数は本川は0.1、支川は0.15とした。河道長は5万分の1の地形図から測定した値の1.5倍とした。(河道の粗度係数および河道長のとり方はピーク流量の発生時刻の観測値と計算値がほぼ一致するように調整した。) 流出係数の値はピーク流量の観測値と計算値が一致するように決定したが、ピーク流量としては全流量 Q_p と全流量 Q_p から先行降雨による流量 Q_{PB} を差引いた流量(直接ピーク流量) Q_{pd} の2通りを計算対象とした(図5)。

先行降雨による流量 Q_{PB} は、図5に示すように、ピーク流量の発生時刻から洪水到達時間だけさかのぼった時刻における流量 Q_0 が洪水到達時間後にどれだけの流量に減少するかを減水部の流量データから読みとり、その値を Q_{PB} とした。

各小流域の流出係数が同一で一定であるとした場合の流出係数とピーク流出高の関係を図6に示す。図6にはピーク流量に対するものと直接ピーク流量に対するものを示したが、どちらの場合も同様な傾向を示し、番号④の洪水以外の点はほぼ一つの曲線上にのり、流出係数はピーク流量が増大するにつれて大きくなる傾向が認められる。洪水番号④の洪水は流域平均で2時間に80mmを超える集中豪雨によって発生したものである。

考察の対象とした5ケースの洪水の降雨分布について分散係数(=標準偏差÷平均値)を求めると、表1のようになる。表中の空間分布は6地点の雨量観測所間の同じ時間の雨量の分布を表わし、時間分布は同一の雨量観測所における洪水到達時間内の雨量分布を表わす。表1によると、洪水番号④の降雨の時間分布の分散係数が1以上と大きくなっていることがわかる。図3の場合も番号④の洪水を除いた他の4点はほぼ一つの曲線上のっており、降雨の空

表 1. 降雨分布の分散係数

洪水番号	ピーク流出高 (mm/hr)	分散係数	
		空間分布	時間分布
1	3.3	0.20~0.58	0.40~0.73
2	7.2	0.17~0.40	0.25~0.71
3	2.8	0.25~0.68	0.59~0.72
4	11.0	0.23~0.61	0.96~1.49
5	14.6	0.24~0.39	0.39~0.64

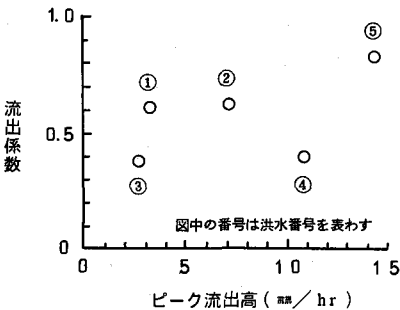


図3 流出係数とピーク流出高の関係(単一流域)

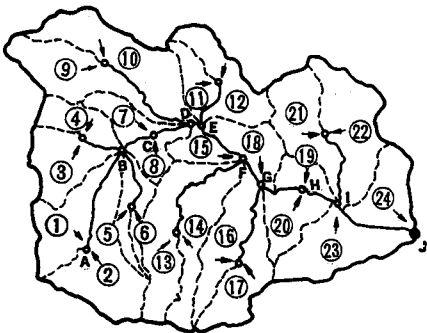


図4 流域分割図

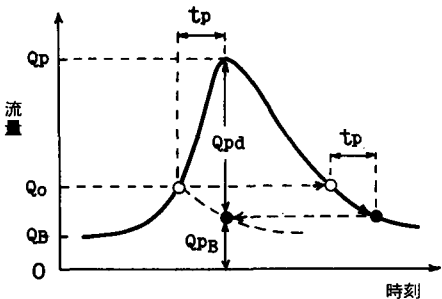


図5 直接ピーク流量の説明図

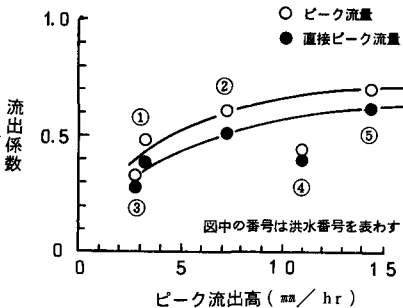


図6 流出係数とピーク流出高の関係(分割流域)

間のおよび時間的な分布の分散係数が小さい場合には単一の流域として合理式を適用しうものと思われる。

図6によると、ピーク流出高が大きくなると、流出係数は大きくなる傾向が認められる。この点を考慮し、流出率と雨量の関係にならって、流出係数 f を洪水到達時間内平均降雨強度 r の関数として次式で表示する。

$$f = a \left(1 - \frac{r_0}{r} \right) \quad (7)$$

(7) 式のパラメーター a は流域の地形、地質、土地利用状態などによって異なる値をとり、 r_0 は地質や土地利用状態のほかに土壤水分状態の影響を受けるものと考えられる。ここで対象としている山地流域では a の値は一定で、 r_0 の値は洪水ごとに変化するものとして、 a と r_0 の値を仮定してピーク流量を計算し、計算値と観測値が一致するように a と r_0 の値を決定した。その結果、 a の値は 0.8 となった。 r_0 は土壤水分状態の影響を受けると考えられるが、ここでは土壤水分状態を表示する量としてピーク流量発生時刻から洪水到達時間だけさかのぼった時刻における流量（図5の Q_0 ）を用いることにし、 r_0 と $(Q_0 - Q_B)/Q_B$ (Q_B は洪水前の流量で、ここでは $Q_B = 10 \text{ m}^3/\text{sec}$ とした) の関係を示すと、図7のようになる。図7にはピーク流量に対するものと直接ピーク流量に対するものを示したが、どちらも同様の傾向を示し、 r_0 は $(Q_0 - Q_B)/Q_B$ が大きくなると急激に減少し、 $(Q_0 - Q_B)/Q_B$ が5以上になるとほぼ一定の値になることがわかる。すなわち、流域が湿潤していないときは $r_0 = 14 \text{ mm/hr}$ 、湿潤状態のときは $r_0 = 3 \text{ mm/hr}$ （ピーク流量）ないし $r_0 = 4 \text{ mm/hr}$ （直接ピーク流量）となる。 $a = 0.8$ とし、 $r_0 = 14, 4, 3 \text{ mm/hr}$ の場合について(7)式の関係を示すと、図8のようにな

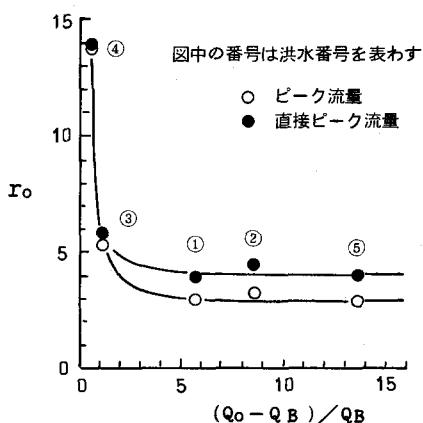


図7 r_0 と $(Q_0 - Q_B)/Q_B$ の関係

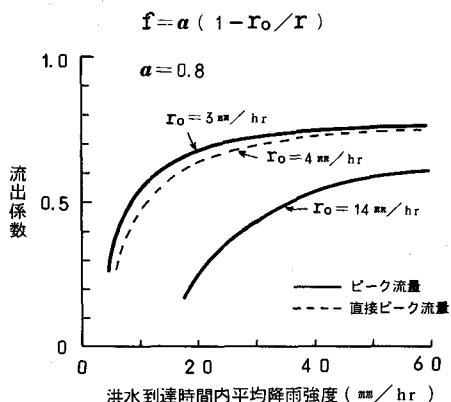


図8 流出係数と洪水到達時間内平均降雨強度の関係

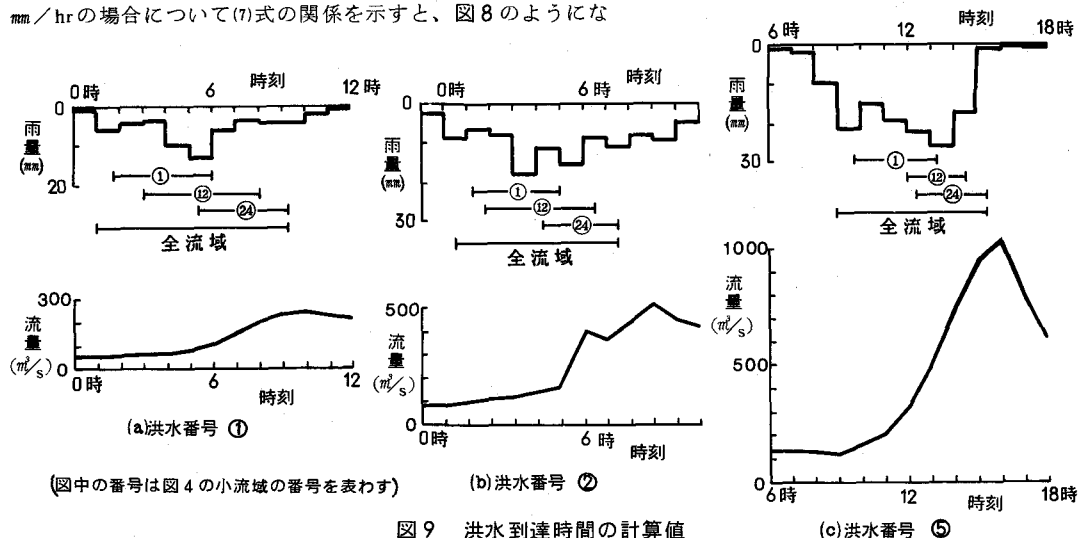


図9 洪水到達時間の計算値

る。図8によると、この場合は先行降雨によるピーク時基底流量の影響は小さいこと、および降雨強度の大きい場合の流出係数の値は0.60～0.75となることがわかる。

流量算定地点および小流域の洪水到達時間の計算例を図9に示す。洪水番号④の洪水については流量算定地点および各小流域の降雨ハイトグラフと洪水到達時間の計算結果を図10に示す。図9に示した洪水の場合には洪水到達時間内の雨量の時間的および空間的な変化が少なく、各小流域の洪水到達時間内平均降雨強度にあまり差がないために、流域を分割せずに単一の流域として合理式を適用しうるものと考えられる。しかし、図10に示した洪水の場合は雨は空間的にはほぼ様な降り方をしているが、時間的には強雨が短時間に集中しているために、各小流域の洪水到達時間内平均降雨強度に大きな差が生じ、この場合には単一流域としての取扱いは適当でなく、流域を分割して合理式を適用すべきであると考えられる。図10によると、上流部の小流域①～⑥に降った強雨は流量算定地点のピーク流量には寄与していないことがわかる。

5. 結 び

合理式による洪水ピーク流量の算定法について考察し、合理式は洪水到達時間内の降雨の時間的および空間的な分布がほぼ一樣な場合に適用すべきこと、および合理式を種々の洪水到達時間内平均降雨強度の降雨に適用する場合には流出係数を洪水到達時間内平均降雨強度の関数として扱う必要があることを示した。洪水到達時間内の降雨の時間的あるいは空間的な変化が大きい場合には、流域を小流域に分割し、小流域に合理式を適用すべきであると考え、そのような場合の洪水ピーク流量の算定法を示した。なお、流出係数は流域面積の大きさによって異なる値をとる可能性が感じられ、この点に関して今後検討する必要がある。

本研究は文部省科学研究費補助金（自然災害特別研究(1)、研究代表者：早稲田大学理工学部吉川秀夫教授）の補助を得たことを記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：水理公式集、昭和46年、
- 2) 建設省河川局：建設省砂防技術基準（案）、山海堂、昭和52年、
- 3) 建設省河川局治水課・土木研究所：流出試験地調査成果報告書（その4）、昭和55年3月、
- 4) 西谷隆亘・牧野立平・芦野昇：流出率について、第39回土木学会年次学術講演概要集、昭和59年10月

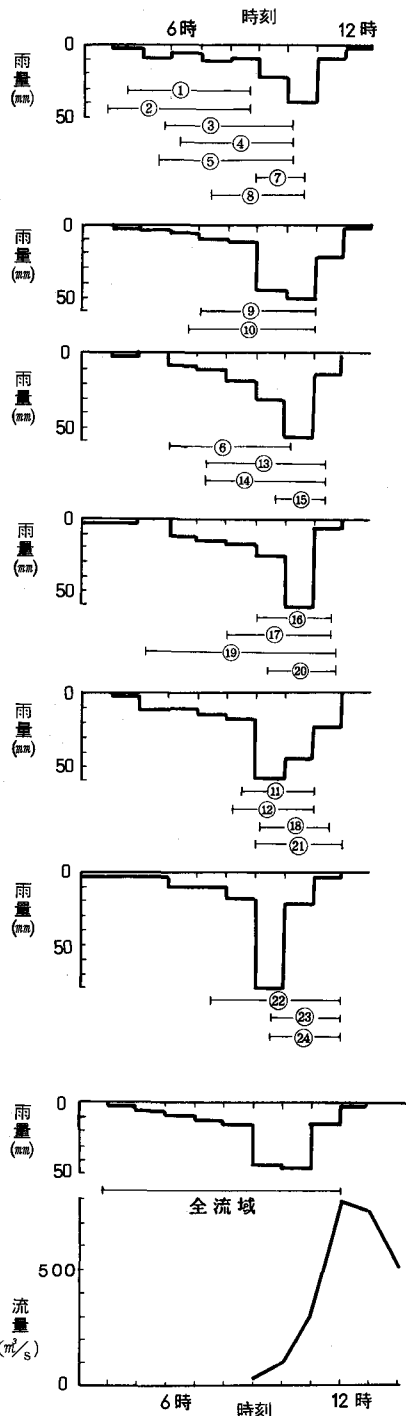


図10 洪水到達時間の計算値（洪水番号④）

（図中の番号は図4の小流域の番号を表す）