

吉野川における分割流域の単位図について

河 角 鶴 夫*
石 井 文 夫**
中 西 秩***

要 旨 本報告は吉野川の池田上流流域を、必要な6つの小流域に分割して、既往最大の出水を見た昭和29年9月12号台風時の水文資料にもとづき、当該洪水に対する各分割流域の単位図ならびにその下流地点に対するてい減変形された単位図を、全流域統一した見解のもとに算出する方法を示したものである。

1. 緒 言

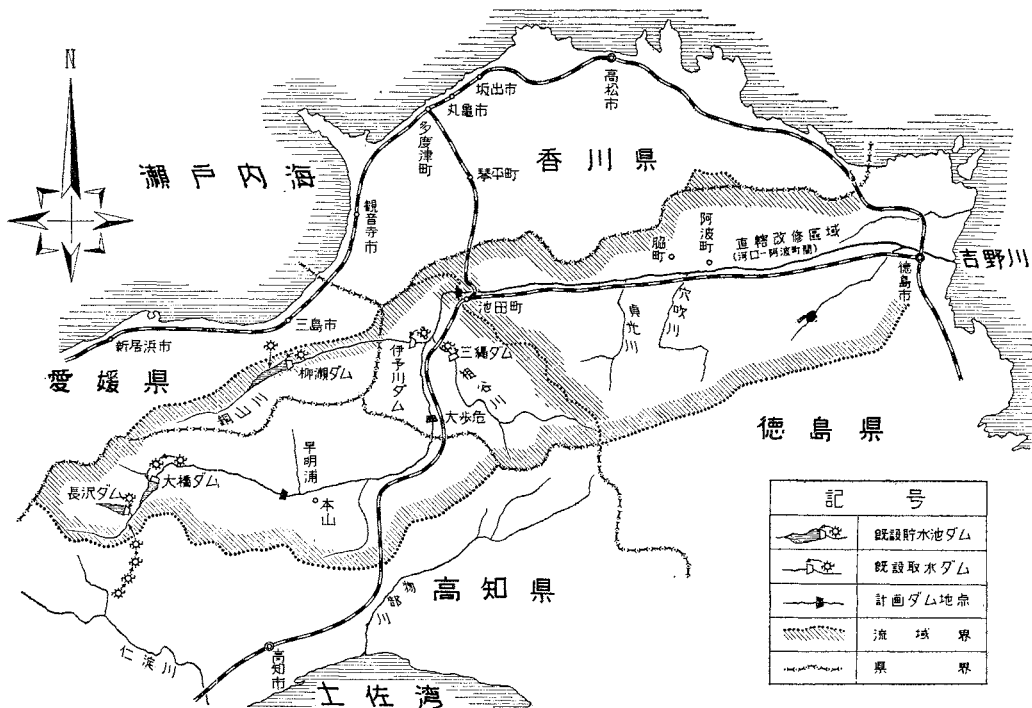
吉野川は図-1に示すように、四国四県にまたがる流域面積 3 653 km²、流路延長 193 km の本邦屈指の大河川で、河口より阿波町岩津に至る 41 km 間は計画高水流量 15 000 m³/sec で直轄改修事業が実施されており、上中流部においては多目的ダム計画が立案されている。

この吉野川においては、昭和20年、29年とほぼ計画高水量にひつ敵する出水を見たのであるが、資料の関係

から昭和29年9月13日、14日の12号台風時の出水記録を基礎として流出解析を行なった。池田地点は流域面積 1 907 km² で、流域内の降雨分布の差を無視しえず、また時間的ずれもあるので、これより上流を図-2のように早明浦、大歩危、銅山川上流、銅山川下流、祖谷川および残流域（主要支川、既設または計画ダム地点にて分割）にわけ、当該地点の分割流域の単位図および下流計画基準地点におけるその分割流域の単位図を求める。こうしてある分割流域よりの流出が、分割地点および下流計画基準地点の間でいかに変化してゆくかを知り、さらに計画基準地点の流出波型の中で、当該分割流域よりの流出分がいかなる位置、波型を占めるかを知らうとするものである¹⁾。

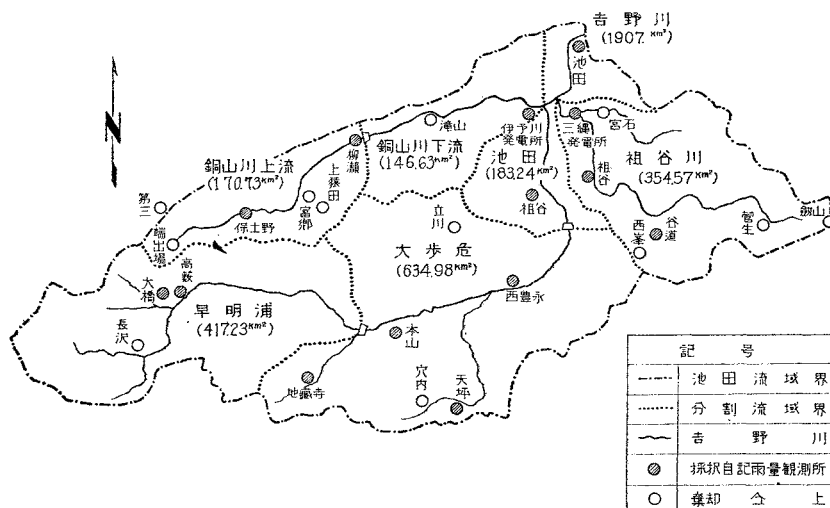
ただし本文は昭和29年12号台風時の洪水についてのみ、その適合性を実証したものであり今後他の洪水に

図-1 吉野川流域概要図



* 正員 建設省四国地建企画室長
** 正員 建設省四国地建河川計画課長
*** 正員 建設省四国地建企画室

図-2 分割流域および雨量観測所配置図



についても検討する必要があるが、ここにその考え方を述べるものである。

2. 解析の方法

任意の一地点における単位図は、その流域の当該降雨までの履歴や降雨特性^{2), 3), 4), 5), 6)}により種々の形態をとるものであるが、ここでは前述の既往最大の昭和29年台風12号時の洪水を解析検討して単位図を作成する。

この場合、問題となる点は流出機構別分類、損失、流出の遅滞である。ここでは流出の機構別分類としては直接流出と基底流出の二成分に分類した。この直接流出に対応する降雨を有効雨量とし、残りの降雨を損失雨量とする。そしてこの損失雨量と総雨量との関係を求めておくことにより、この関係曲線を用いて降雨からあらかじめ損失雨量をさし引いて有効雨量を求める^{7), 8)}。この雨量を直接流出の対象として計算を進め遅滞を次に決定する方法によった。

この有効雨量に対応する直接流出については、立神博士の概念⁹⁾にしたがい集中と貯溜の二つの異なる遅滞作用をうけるものとした。この両作用についてここでは各分割流域の集中作用は、その分割流域の最下流地点においてもまた、その地点より下流地点においても全く同様な作用をうけ、貯溜作用についてのみその地点間にある流路に起因して異なる作用をうけるものとする立場をとることとした。この集中作用は工学的実用上より等高線に直角に測った距離が等しい点から同時刻に流出するものとし、また貯溜作用はその間にある流路の水面積に関係あるものとして貯溜係数との相関を求めた¹⁰⁾。以上の前提に従って各分割流域の各地点に対するそれぞれの単位図を設定し、これに有効雨量を適用して直接流出量を求め、これに基底流出量を加えて計算流出量を算出

しこれを実績と対比した。

すなわち、ここに述べる流出解析は従来の単位図の概念を踏襲し、単位図の線型性の原理を認めているが、洪水における支川の合流状態を推定したり、ダムカットの影響等を知る上に有効であると考えられる。

3. 水文気象

(1) 降雨

昭和29年9月13～15日の台風12号は吉野川に既往最大の出水をもたらした最大級の台風である。

池田上流における自記雨量観測所は図-2のように25カ所あるが、欠測、信ぴよ性等の理由によりこのうち14カ所の毎時間雨量資料によつて、6分割流域の平均雨量を各流域内の観測所の算術平均により求めると図-3、表-1のようになる。

表-1 12号台風時分割流域平均雨量 (単位 mm)

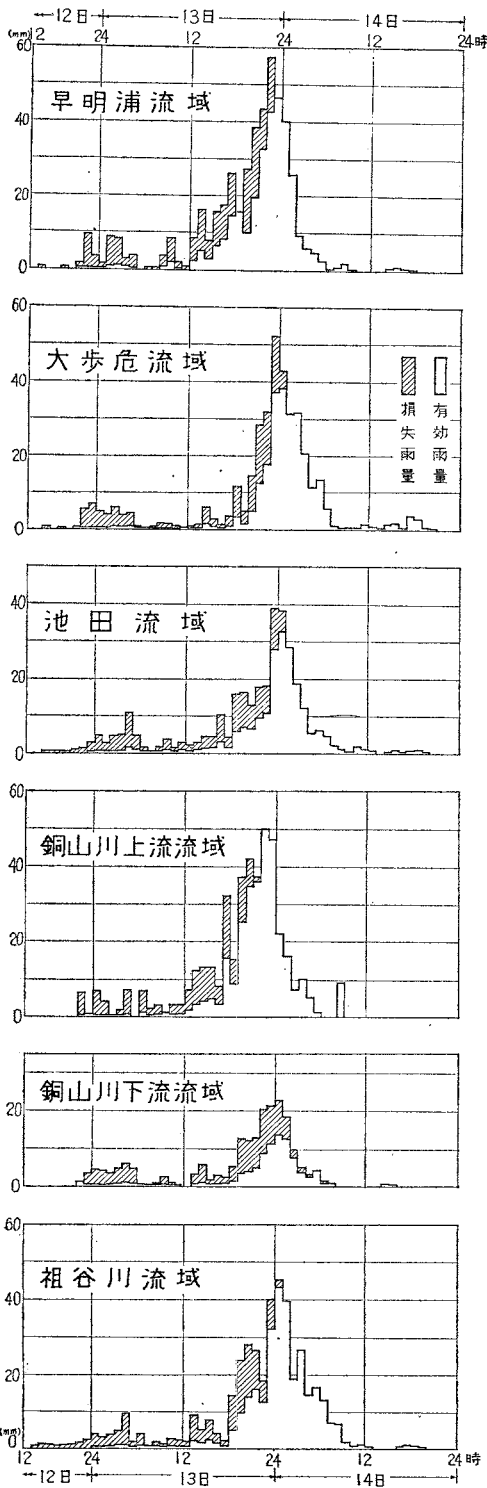
日 時	早明浦	大歩危	池田	銅山川上流	銅山川下流	祖谷川
12日11時～15日9時 総雨量計	468.9	368.8	314.1	428.6	198.6	405.9

(2) 水位、流量

分割流域の流量を代表する地点として図-1に示す中島(早明浦)、大歩危、柳瀬ダム、伊予川発電所取水ダム、三繩発電所取水ダムおよび池田地点における実測時間流量曲線は図-13のようになる。このさい吉野川本川上流、長沢、大橋貯水池ではほとんど洪水調節は行なわれていない状態であり、銅山川上流柳瀬貯水池では洪水調節が行なわれたので、これより下流は洪水調節(人工操作)が行なわれなかつた状態に修正して表現した。

4. 流出の分離

図-3 12号台風時分割流域平均有効損失雨量



(1) 流出の分離

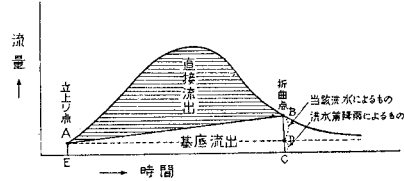
直接流出と基底流出の分離については、流出曲線のてい減部は、初めの流量を q_0 、 t 時間後の流量を q とすれ

ば一般に

$$q = q_0 e^{-cbt} \dots\dots\dots (1)$$

の形であらわされるので片対数紙にプロットして、その直線状の折曲した点を折曲点Bとして、この点で直接流出が終り、この点以後基底流出のみになると考える。折曲点より以前の流出については 図-4 に示すように洪水

図-4 流出の分離



の立ち上がり点をAとし、AとBを直線で結び、これより上を直接流出、下を基底流出とする。基底流出はさらに当該洪水によるものとそれ以前の降雨によるものに分離され洪水前の降雨による流量は時間的に変化しない、すなわち初期流量に等しいものと仮定する。

$$AE = DC = q_a = \text{初期流量}$$

$$BD = BC - DC = BC - AE = q_b = \text{折曲点流量}$$

とする。

(2) 損失雨量

いま次式にしたがつて池田地点における昭和 29 年から昭和 32 年にいたる 11 個の洪水についてそれぞれ流域平均総雨量 R を求め、流出曲線より直接流出すなわち有効雨量 R_E を分離し損失雨量 R_L を求める。

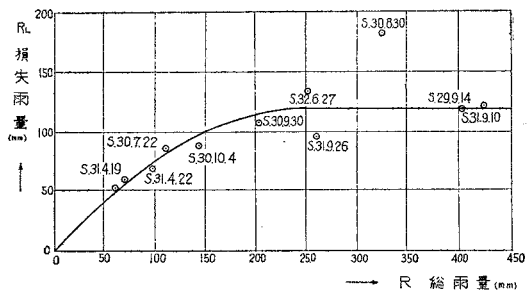
$$R = \frac{\sum(\text{分割流域面積 } A_i) \times (\text{分割流域平均総雨量 } R_i)}{\text{全流域 } A}$$

$$R_E = \frac{\text{直接流出総量 } \sum Q}{\text{全流域 } A}$$

$$R_L = R - R_E$$

..... (2)

図-5 総流出量損失雨量関係図



これを図示すると吉野川では R_L は 図-5 のように R の関数として与えられると考えられる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} R < 240 \text{ mm} \quad R_L &= R(1 - 0.00318 R^{0.923}) \text{ mm} \\ R > 240 \text{ mm} \quad R_L &= 120 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

で与えられる。

(3) 有効雨量の分離

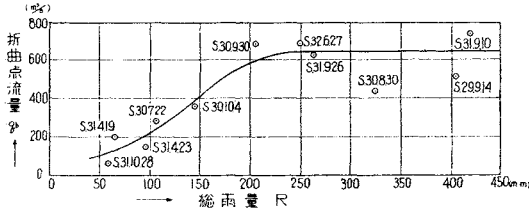
(3) 式でえられた関係式は池田地点の流域平均総雨量と損失雨量の関係式であるが、これは実用上、累加雨量

と累加損失雨量との関係式ともみなしうる。またこの関係を各分割流域にも適用できるものとする。この関係を用いて 12 号台風時の毎時の分割流域平均雨量を有効雨量と損失雨量に分離してみると 図-3 のようになる。

(4) 折曲点流量

池田地点における折曲点流量 q_b は (1) で述べたように洪水前の降雨には無関係であつて当該降雨のみに関係する。ここでは池田地点における流域平均総雨量との間の相関を求めてみた。昭和 29 年から昭和 32 年までの 11 洪水についてプロットしてみると 図-6 のようになる。

図-6 総雨量折曲点流量関係図



(5) 基底流出

a) 池田地点 初期流量 q_a としては昭和 29 年 9 月 12 日 18 時 $130 \text{ m}^3/\text{sec}$, 折曲点流量 q_b として 15 日 16 時に 図-6 から $650 \text{ m}^3/\text{sec}$ とする。池田地点に流出してきた各分割流域からの基底流出は、前述時間においてそれぞれ流域面積に比例した値を有するものとしてさしかえないであろう。この値は 表-2 のとおりである。

表-2 池田における分割流域折曲点流量

流域名	流域面積 (km ²)	流域面積比	初期流量 q_{ai} (m ³ /sec)	折曲点流量 q_{bi} (m ³ /sec)
早明浦	417.23	0.219	28	142
大歩危	634.98	0.333	43	216
池田	183.24	0.096	12	62
銅山川上流	170.73	0.089	12	58
銅山川下流	146.63	0.077	11	50
租谷川	354.57	0.186	24	122
全流域	1907.38	1.000	130	650

この仮定ならびに基底流出が q_{ai} から q_{bi} まで直線的に変化するとして、基底流出を分離した前述の仮定を組み合わせると 12 日 18 時より折曲点時刻 15 日 16 時までの間における t 時間後の基底流量 q_{ti} は

$$q_{ti} = q_{ai} + \frac{q_{bi}}{70} t$$

であらわされる。

表-3 早明浦、大歩危、柳瀬の初期および折曲点流量

分割地点	初期流量		折曲点流量	
	日時	流量	日時	流量
早明浦	13日1時	30 m ³ /sec	14日20時	150 m ³ /sec
大歩危	早明浦	30 "		150 "
	大歩危	50 "	15日0時	220 "
計		80 "		370 "
銅山川上流	13日1時	20 "	15日1時	95 "

b) 分割地点 各分割地点における 12 号台風時の基底流出は種々の条件を勘案して 表-3 のとおりとする。したがって前項と同様に初期流量の時間より t 時間後の基底流出量は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \text{早明浦} & q_t = 30 + \frac{150}{43} t \\ \text{大歩危(早明浦流域をふくまず)} & q_t = 50 + \frac{220}{47} t \\ \text{(早明浦流域をふくむ)} & q_t = 80 + \frac{370}{47} t \\ \text{銅山川上流} & q_t = 20 + \frac{95}{48} t \end{aligned} \right\} \dots\dots (5)$$

5. 集中効果

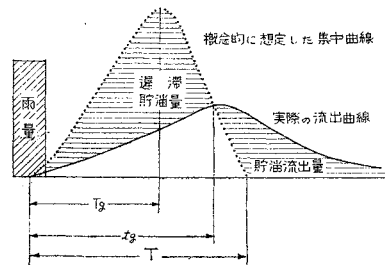
(1) 集中をあらわす式の決定

出水における直接流出と定義された部分について、集中効果と貯溜効果の二つの遅滞作用を考える。

集中とは、ある距離に対してある遅滞があるという考え方で、流域内のある一点に降つた雨が下流へ流れてくる集中時間 T 時間は、等高線に直角に測つた距離 L km のみの関数で他の流域特性を示す諸要因は係数としてあらわされるものとする、集中式は一般に次式であらわされる。

$$T = \alpha L^\beta \dots\dots (6)$$

図-7 概念的に想定した集中曲線



いま流域に単位時間一様強度の有効雨量のあつた場合を考えると 図-7 のような流出があると考えられる。図-7 において

- T : 降雨から集中の終るまでの時間 (流域最遠点からの集中時間)
- t_g : 降雨から流出量曲線の頂点までの時間 (頂点流量のおくれ)
- T_g : 降雨から集中曲線の頂点までの時間 (最大流域巾の地帯からの集中時間)

これらの時間に対応する距離は T_g に対して最大流域巾までの距離 L_g , T に対しては最遠点からの距離 L , t_g に対する距離は $l_g = \sqrt{Lg \cdot L}$ 等各説あるが、吉野川では $t_g = T$ とし、流域最遠点 L からの降雨が t_g 時間で流出してくるものとして集中式を作成してよいことが明らかとなつた。

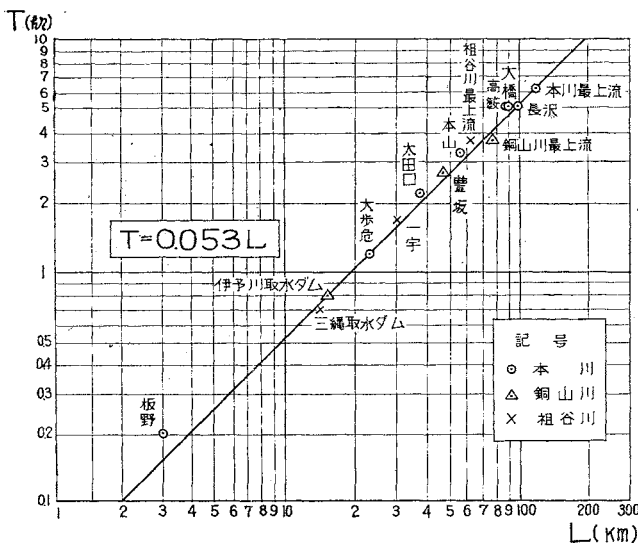
昭和 29 年 12 号台風時の吉野川水系各地点における

表-4 昭和29年12号台風時における吉野川水系各地点洪水集中時間
(頂点流量のおくれ)

本川支名	地名	L 同左の池田 よりの距離	降雨の重心 時刻	流量の重心 時刻	T 集中時間
本川	最上流	117 km			(6.2) 時
	長沢	98	日 時 13 23	日 時 13 24	1
	大高橋	89	23	24	1
	中橋	86	23	24	1
	大本山	60	23	14 2	3
	大田山	38	23	3	4
	大歩危	23	23	4	5
	川口野	16	23	1	6
	板野	3	23	5	6
	池田	0	23	5.2	6.2
穴内川	最上流	77			
	繁藤	58	13 23		
	大杉	45	23		
	合流点	40	23		
銅山	最上流	77			(3.8)
	豊坂	47	23	13 24	1
	柳瀬	39	23		
	大野	18	23		
	伊予川取水	15	23	14 2	3
	岩戸合流	13	23		
租谷川	最上流	62			(3.7)
	一字取水	30	14 1	14 3	2
	三縄取水	14	1	4	3
	合流点	10	1		

注：() は各流域最上流端から池田までの想定集中時間

図-8 昭和29年12号台風時吉野川水系集中距離集中時間関係図



頂点流量のおくれを調べると表-4 のようになり、これを主要支川ごとに最上流地点を基準として T と L の関係を図示すれば図-8 のようになり集中式として

$$T = 0.053 L \dots\dots\dots (7)$$

がえられる (ただし T : h, L : km)。

ここに説明した集中式は最上流点を基準点としてプロットすることにより、従来の下流点を原点として作成し

た集中式とは本質的にその意味を異にし、その水系における任意点の集中式が必要なときは、座標変換することによってただちに得られる。またこのようにして得られた集中式によれば各分割流域の流出は、対象基準地点が相違しても集中形は同じであることをあらわすものであり、貯溜効果の相違によつてのみその流出形に相違が生ずることになる。なおこの集中式が一般に $T = \alpha L^\beta$ の形で表わされても上記のことはいえる。

(2) 集中面積図

前項において集中式が求まったので、まず集中面積図を作成する。1/50 000 地形図単位距離 $dL = 5 \text{ km}$ で分割し、その地帯の面積 $dA \text{ km}^2$ を各分割流域別に求め横軸に L, 縦軸に dA/dL をプロットする。この集中面積図は任意距離にある集中量はいくらであるかを示したものである。

(3) 集中曲線図

求められた集中面積図から任意時間における集中量を求める。すなわち $i \text{ m}^3/\text{sec}$ を T 時の流出量とすれば単位降雨 1 mm に対しては

$$T = \alpha L^\beta$$

$$i = 0.2778 \frac{dA}{dT} = 0.2778 \frac{1}{\alpha \beta} L^{1-\beta} \frac{dA}{dL}$$

吉野川においては (7) 式から

$$i = \frac{0.2778}{0.053} \frac{dA}{dL} \dots\dots\dots (8)$$

よつて (7) 式 (8) 式より前項の集中面積図 $L - \frac{dA}{dL}$ 図より集中曲線 T-i 図がえられる。

6. 貯溜効果

(1) 貯溜効果について

貯溜効果は洪水追跡法の考え方に従つて集中曲線を流入量とし、連続式を用いて流出量を推定する。すなわち

$$S: \text{貯溜量 (m}^3\text{)}$$

$$q: \text{流出量 (m}^3\text{/sec)}$$

$$i: \text{流入量 (m}^3\text{/sec)}$$

K: 貯溜係数 (hr) 常数で洪水のてい減係数の逆数
ここで流入量 $i=0$ の場合にえられる貯溜関係が、そのまま流入量のある場合の貯溜作用にも適用できるものとする

$$\left. \begin{aligned} \text{貯溜方程式} \quad S &= Kq \\ \text{連続方程式} \quad \Delta S &= (i - q) \Delta t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

この両式から $\Delta t = a$ としサフィックス n を n 時を表わ

すとし、

$$k_1 = \frac{2K}{a} + 1, k_2 = \frac{2K}{a} - 1 \dots\dots\dots(10)$$

とおくと

$$q_{n+1} = \frac{1}{k_1} (i_n + i_{n+1} + k_2 q_n) \dots\dots\dots(11)$$

したがって k_1, k_2 がえられれば i_n, i_{n+1} は前節により与えられ、 $q_{n=0}=0$ であるから q_{n+1} が順次計算できる。

(2) 貯溜係数

一般に洪水流出量曲線のてい減部では

$$q = q_0 \cdot e^{-cbt} \dots\dots\dots(12)$$

微小時間においては

$$\Delta q = -C_b q \Delta t$$

また流入量 $i=0$ とすれば (9) 式から

$$\Delta S = -q \Delta t = K \Delta q$$

したがって

$$C_b = \frac{1}{K} \dots\dots\dots(13)$$

この K を貯溜係数と定義する。すなわち貯溜係数はてい減係数の逆数であらわされる。

ここで各分割流域の貯溜係数を求めることが問題となるわけであるが、まず直接流出の貯溜効果が洪水時の水面積に支配的な関係があるものと推定した。

そこで 1/50 000 の地図上で池田、大歩危、早明浦、柳瀬の各地点において、その地点より上流の河川流路として表わされている部分について、洪水時の河巾を推定

表-5 各地点水面積とてい減係数

地 点	水 面 積	てい 減 係 数
早 明 浦	6 000 000 m ²	0.1981 hr ⁻¹
大 歩 危	9 300 000	0.1872
池 田	14 890 000	0.1258
柳 瀬	7 000 000	0.1887

表-6 各分割流域てい減係数貯溜係数

対象地点	分割流域	水 面 積 (m ²)	C _b てい減係数 (hr ⁻¹)	K 貯溜係数 (hr)	a=0.5 hr		a=1.0 hr	
					k ₁ = $\frac{2K}{a} + 1$	k ₂ = $\frac{2K}{a} - 1$	k ₁ = $\frac{2K}{a} + 1$	k ₂ = $\frac{2K}{a} - 1$
早 明 浦	早 明 浦	6 000 000	0.192	5 208	21 333	19 833	11 417	9 417
大 歩 危	早 明 浦	8 500 000	0.187	5 348	22 390	20 390	11 695	9 695
	大 歩 危	3 300 000	0.192	5 208	21 833	19 833	11 417	9 417
柳 瀬	銅山川上流	700 000	0.196	5 102	21 408	19 408	11 204	9 204
池 田	早 明 浦	11 040 000	0.170	5 882	24 528	22 528	12 764	10 764
	大 歩 危	5 840 000	0.190	5 263	22 052	20 052	11 526	9 526
	池 田	2 540 000	0.194	5 155	21 620	19 620	11 310	9 310
	銅山川上流	1 950 000	0.195	5 128	21 512	19 512	11 256	9 256
	銅山川下流	1 250 000	0.195	5 128	21 512	19 512	11 256	9 256
	租 谷 川	1 100 000	0.195	5 128	21 512	19 512	11 256	9 256

表-7 早明浦、大歩危、柳瀬および池田地点単位図

(単位 m³/sec/mm)

時 間	早明浦地点	大 歩 危 地 点		柳瀬地点	池 田 地 点						
		早 明 浦	大 歩 危		早 明 浦	大 歩 危	池 田	銅山川上流	銅山川下流	租 谷 川	
0	0		0	0			0			0	
1	6.3		8.3	4.9			0			5.4	
2	16.2	0	22.2	8.6			8.0			9.1	
3	20.0	5.4	27.9	7.1	0		21.6			7.5	
4	16.5	14.5	23.0	5.8	5.1		27.1			6.2	
5	13.6	18.0	19.0	4.8	13.1		22.4			5.1	
6	11.2	15.0	15.7	3.9	16.4		18.5			4.2	
7	9.2	12.4	12.9	3.2	13.9		15.3			3.5	
8	7.6	10.3	10.6	2.6	11.7		12.6			2.9	
9	6.1	8.5	8.8	2.2	9.9		10.4			2.3	
10	4.6	7.1	7.2	1.7	8.3		8.6			1.9	
11	3.1	5.9	6.0	1.3	7.0		7.1			1.4	
12	1.5	4.8	4.9	0.9	5.9		5.9			0.9	
13	0	4.0	3.9	0.4	5.0		4.9			0.5	
14		3.3	3.0	0	4.2		4.0			0	
15		2.7	2.0		3.6		3.3			0.9	
16		2.0	1.0		3.0		2.7			0.8	
17		1.3	0		2.5		2.0			0.6	
18		0.7			2.1		1.3			0.4	
19		0			1.7		0.7			0.3	
20					1.3		0			0.1	
21					0.8					0	
22					0.4						
23					0						

し、流路長と河中とから水面積を測りとつた。この水面積と各地点の直接流出のてい減係数とプロットしてみると表-5、図-9 のようになる。これからみると上のようにして求めた水面積と直接流出のてい減係数はある関係があると認めてもよさそうである。この図より分割流域の懸案地点におけるてい減係数を求めるには、各分割流域の占める水面積に懸案地点までの流路の水面積を加えることによつて懸案地点に対する分割流域の水面積とし、この水面積に対応して、貯溜係数が求まるわけである。このようにして求めた貯溜係数を表-6 に示す。

7. 単位図

以上のようにして直接流出に対する集中効果および貯溜効果がわかつたので、単位降雨に対する流出量曲線すなわち単位図が求められる。すなわち(11)式において i_n に集中曲線図を用い、 k に表-6の数值を適用して単位流出量曲線を作る。しかしこの流出量曲線は無限に

続くので、基長の概念を入れてこれを修正する。図-10のように基長の最終点から単位図に接線をひき、かつ単位図の全面積が全流域に単位降雨のあつた場合の全流出量になるように、各縦距に一定値を乗じて最終的な単位図をうる。ここに各分割流域の各懸案地点における基長は、折曲点その他を勘案して推定した。この求められた単位図を示せば表-7、図-11 のようになる。

いま早明浦流域の単位図が早明浦、大歩危、池田に流

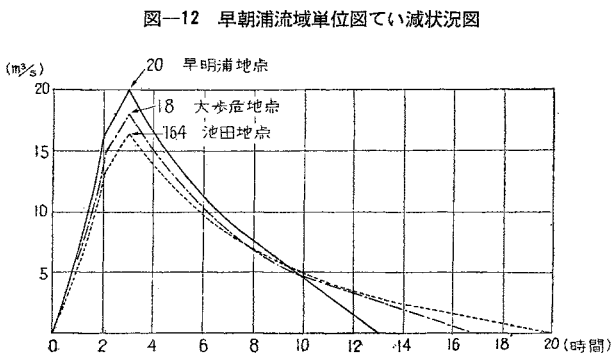
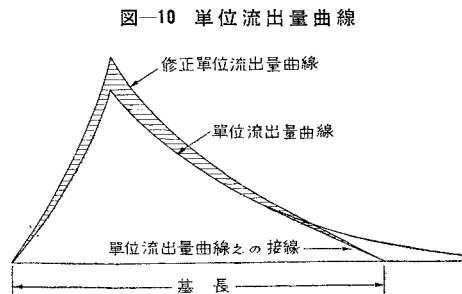
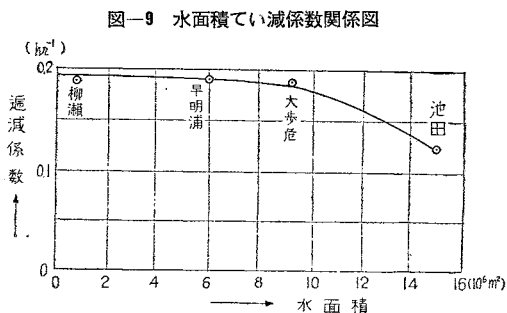


図-11 各地点単位図

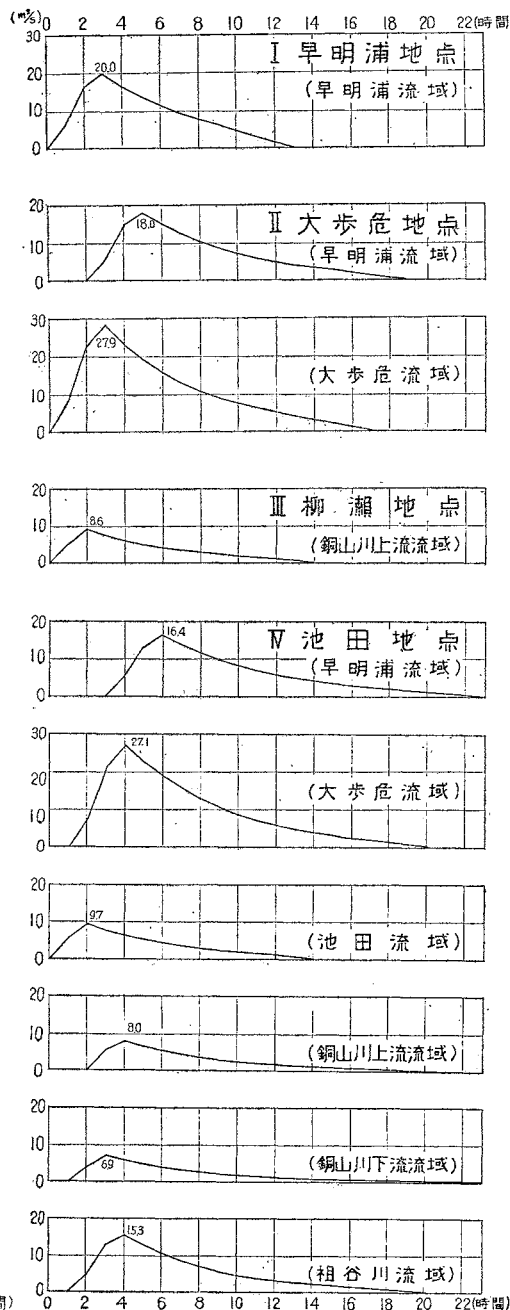
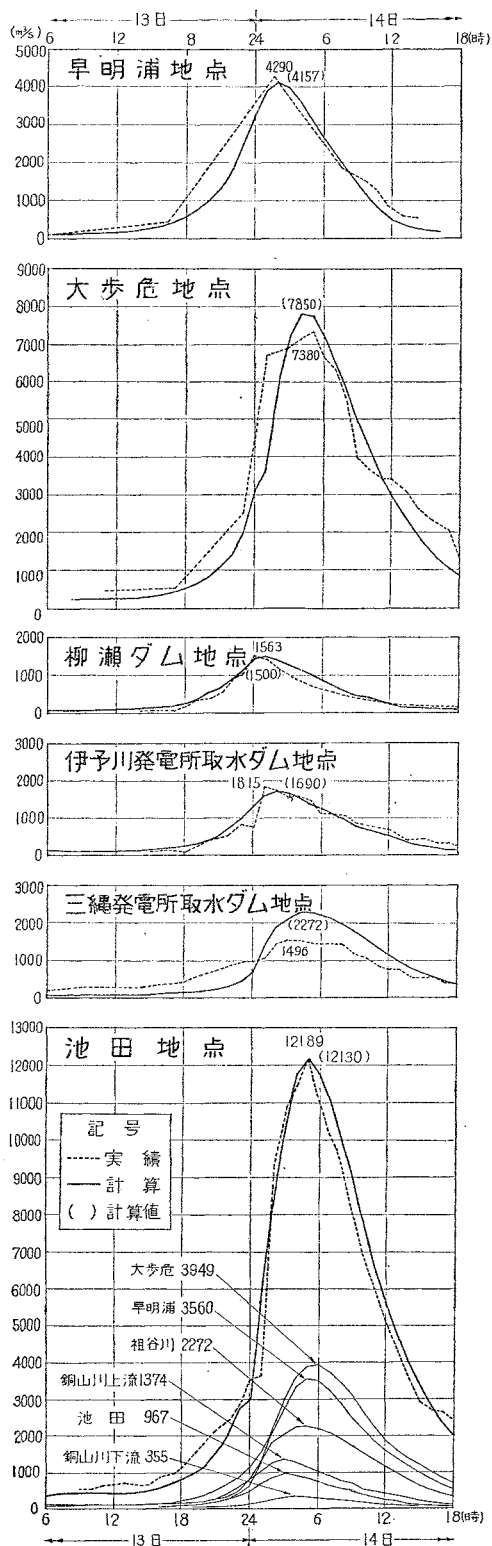


図-13 流出量曲線



下するにつれていかに変化するかをピーク時間を合わせて図示すると 図-12 のようになり、そのピークは大歩危、池田地点では早明浦地点の 90%、82% となる。

以上によつて各分割流域の各分割地点ならびにその下流各地点における単位図がえられる。

8. 計 算

こうしてえられた各分割流域の単位図 表-7、図-11 を 図-3 の有効雨量に適用して、各分割流域の直接流出量を計算し 4. (5) で求められた基底流出量を加えて全流出量をうる。これを各地点ごとにプロットし、さきにえられた実測値と比較したものが 図-13 である。ただし伊予川、三縄発電所ダム計算流出量は、池田地点における銅山川、祖谷川流出量を 1 時間前にずらして図示した。

9. 結 言

以上特定出水時の水文気象資料と流域の地形的特性から、大流域における各分割流域の単位図を設定する方法を述べた。これらの単位図よりえられた各地点の計算流量値と実測流量値とは 図-13 に明らかなように、きわめてよく合致し、全流出の中における各分割流域の役割が明らかになった。

最後に以上の報告をまとめるあたり、四国地方建設局 原 弘治、山田克彦、山崎 照の諸氏の御協力をえたことを心より感謝する。

参 考 文 献

- 1) 染原孝太郎：河川流出に関する近似解法について、建設省直轄工事第 6 回技術研究報告
- 2) 志賀是文：降雨特性に関する二、三の考察、土木学会論文集第 59 号
- 3) 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、土木学会誌第 41 巻第 3 号
- 4) 石原藤次郎・金丸昭治：降雨条件の変動による単位図の変化について、土木学会論文集第 32 号
- 5) 岩垣雄一・高神塚馬：降雨および流域特性が流出関係におよぼす効果について、京大防災研究所創立 5 周年記念論文集
- 6) 石原藤次郎・高神塚馬：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
- 7) 中安米蔵：雨量より洪水量の推定について、建設省直轄工事第 4 回技術研究報告
- 8) 中安米蔵：本邦河川洪水の Unit graph について、建設省直轄工事第 7 回技術研究報告
- 9) 立神弘洋：洪水流出の新解析法
- 10) 藤 經・横 戸・永野技官：岩木川計画洪水量計算法、建設省直轄工事第 5 回技術研究報告

土木学会誌合本用ファイル

B 5 判学会誌 12 冊とじ用
薄グリーン・クロース装 金文字入り

140 円 (〒30 円)

入金次第発送いたします。