

補遺 6

原洪水資料を用いた洪水流出計算例

補遺 6 原洪水資料を用いた洪水流出計算例

近年、流域内の都市化の進行、ゴルフ場の造成、山林の開発などにより、内水域の流出機構が著しく変化しており、既設樋門管の安全度が低下してきている。このため樋門管の改築、新設計画が相当数にのぼっている。樋門管が対象とする小流域からの流出計算手法は今のところ確立されているとはいえ、流出量予測のために各々の流域で採用されたモデルもまちまちで、合理的で普遍性のあるモデルが無いため苦慮しているのが実状である。流出計算に用いられるモデルには、貯留関数法に代表される集中定数系モデル、等価粗度法に代表される分布定数系モデルがあり、両者には表-1に示す長所、短所があることが知られている。

表-1 集中・分布型モデルの比較

	計算時間	物理性	備考
集中定数系モデル	早い	なし	貯留関数法
分布定数系モデル	遅い	あり	等価粗度法

河川研究室ではこの両者の長所をあわせ持つ貯留関数モデルを開発し、多数の小流域に適用してその有効性を検証してきた。このモデルは斜面上の雨水流の挙動を表現した等価粗度法の理論解から導かれており、モデルパラメータが流域特性値（等価粗度、斜面勾配、流域面積）および降雨特性値（平均降雨強度）で定量化されている点に特徴がある。

採用貯留関数モデルは表-2に示される。

表-2 採用貯留関数モデル

$s = k_1 q^{p_1} + k_2 \frac{d}{dt}(q^{p_2})$	(1)
$\frac{ds}{dt} = r - q$	(2)
$k_1 = 2.8235(n/\sqrt{i})^{0.6} A^{0.24}$	(3)
$= 2.8235 f_c A^{0.24}$	(4)
$k_2 = 0.2835 k_1 \bar{r}^{-0.2848}$	(5)
$p_1 = 0.6$	(6)
$p_2 = 0.4648$	(7)
ここで、	
s : 貯留高 (mm)	f_c : $(n/\sqrt{i})^{0.6}$ で表わされる未知定数
r : 有効雨量 (mm/hr)	A : 流域面積 (km^2)
q : 流出高 (mm/hr)	\bar{r} : 平均有効雨量強度 (mm/hr)
k_1, k_2, p_1, p_2 : モデルパラメータ	n : 等価粗度
	i : 斜面勾配

表-2に示した貯留関数モデルは(1)式においてパラメータを4個持ち、一見複雑に見える。しかしながら、唯一の未知定数は(4)式中の $f_c = (n/\sqrt{i})^{0.6}$ であり、この値が決定されれば、パラメータ k_1, k_2, p_1, p_2 は(4), (5), (6), (7)式により自動設定される。洪水資料が既知のとき f_c 値は実測直接流出高と計算流出高の誤差2乗和が最小となるよう、次元探索により同定することが可能である。すなわち、次式を評価基準とする。

$$\text{Min}_{f_c} J(f_c) = \sum_{j=1}^N (q_j^* - q_j(f_c))^2 \quad \text{.....} \quad (8)$$

ここで、 q_j^* : ある時刻 j における実測直接流出高、 $q_j(f_c)$: f_c が与えられたときの計算流出高、 N : 流出高標本数。

ここでは、原洪水資料を用いて洪水再現計算を行うまでの過程を具体的に示す。実用面での理解を深めるため、実際に数例の洪水資料を用いて以下に示す手順に従って計算してみることをすすめる。また、 f_c 値の同定に用いるプログラムを掲載しておくので参照されたい。

① 原洪水資料の収集 (表-3)

対象とする洪水資料は、おおむね次の基準で収集する。すなわち、流域面積は 600 (km²) 以下、ピーク比流量は 0.5 (m³/s/km²) 以上とする (ピーク比流量はピーク流量を流域面積で除した値である)。当手法が流出現象のうちの河道遅れを考慮しなくて良い小流域を対象としていること、降雨強度の大きい洪水が表面流出により生起していること等を前提として基準が設定されている。

表-2 に示される貯留関数モデルにおいては流出高 q (mm/hr) が計算されるので、観測流量 Q (m³/s) を次式により流出高に変換しておく必要がある。

$$q = 3.6 Q / A \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 A : 流域面積 (km²)

② 原洪水資料の図化 (図-1)

収集した洪水資料 (降雨、流量) を図化する。原資料は必ず図化することが重要である。ハイドログラフの形状を見るだけでなく、データ中の異常値の発見が容易となる。原資料の精度が解析結果に大きく影響するため、十分な吟味を行うことが望ましい。

③ 流出高の図化および直接流出成分の分離 (図-2)

①において得られた雨量と流出高を片対数紙に図化し、流出立上り点と減水部第2折点を結び、直接流出成分を分離する。ハイドログラフ

を片対数紙 (流出高を対数軸にとる) に描くと、減水部が2本または3本の直線で近似できる。2本のときはその折点、3本のときは第2の折点が直接流出成分 (表面流出+中間流出) の終了時であると考えられており、その点と流出の立上り点とを結ぶことにより直接流出成分を分離する。当モデルが対象としている成分が表面流出であり、直接流出成分がこれに対応すると考えられるので、こうした作業を行う必要がある。直接流出成分直下の成分は基底流出成分である。

表-3 原洪水資料

対象洪水諸元 (別冊洪水データ集, 洪水番号 88)							
河 川 名		忠 類					
洪水生起年月日		1975年8月5日1時					
洪水継続時間		36時間					
降雨継続時間		19時間					
流 域 面 積		8.9 (km ²)					
ピ ー ク 流 量		7.88 (m ³ /sec)					
ピ ー ク 比 流 量		0.88 (m ³ /sec/km ²)					
No.	雨量 (mm)	流量 (m ³ /s)	流出高 (mm/h)	No.	雨量 (mm)	流量 (m ³ /s)	流出高 (mm/h)
1	0.50	0.91	0.37	19	3.50	6.60	2.67
2	1.00	0.91	0.37	20	0.00	5.33	2.16
3	0.50	0.91	0.37	21	0.00	4.69	1.90
4	3.00	0.91	0.37	22	0.00	4.09	1.65
5	3.00	1.05	0.42	23	0.00	3.53	1.43
6	4.00	1.15	0.47	24	0.00	3.00	1.21
7	3.50	1.42	0.57	25	0.00	2.60	1.05
8	2.00	1.48	0.60	26	0.00	2.22	0.90
9	2.50	1.42	0.57	27	0.00	1.99	0.80
10	5.00	1.42	0.57	28	0.00	1.93	0.78
11	3.50	1.72	0.70	29	0.00	1.84	0.74
12	2.00	1.78	0.72	30	0.00	1.78	0.72
13	6.00	1.78	0.72	31	0.00	1.72	0.70
14	10.00	2.25	0.91	32	0.00	1.66	0.67
15	15.50	3.81	1.54	33	0.00	1.66	0.67
16	20.50	5.33	2.16	34	0.00	1.60	0.65
17	15.50	7.55	3.05	35	0.00	1.60	0.65
18	5.50	7.88	3.19	36	0.00	1.54	0.62

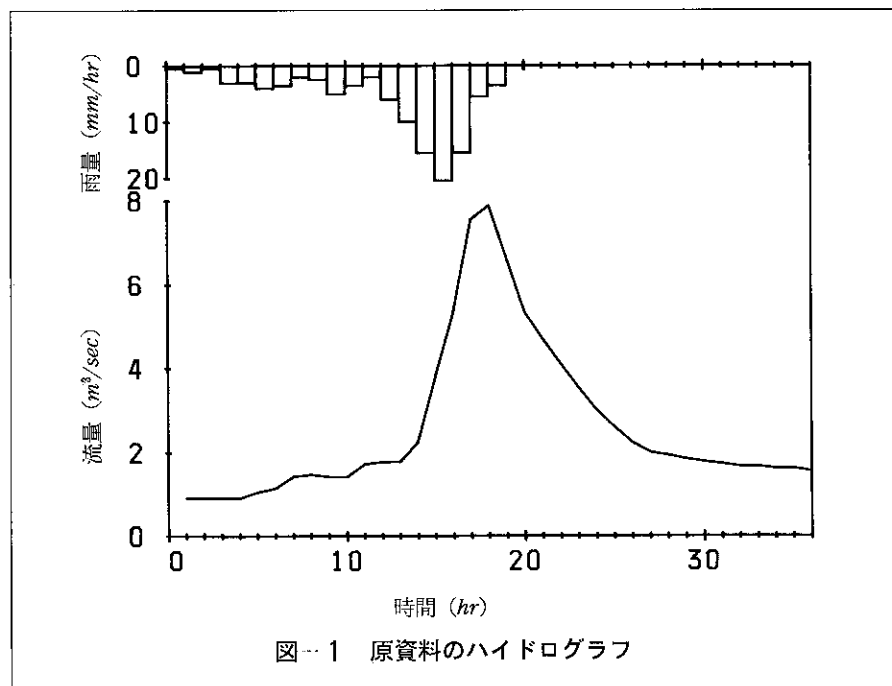


図-1 原資料のハイドログラフ

④ 直接流出成分および有効雨量の計算
(表-4)

直接流出成分は流出高から基底流出成分を差引くことにより計算される。表-4に示される記号を用いて基底流出成分は次式で計算される。

$$QB = Q1 + N \times \frac{Q2 - Q1}{N2 - N1} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 QB ：基底流出高 (mm/hr), $N1$ ：分離開始点, $N2$ ：分離終了点, $Q1$ ：分離開始点の流出高 (mm/hr), $Q2$ ：分離終了点の流出高 (mm/hr), N ： $N1, N2$ 間の任意時刻。

表-4によれば、 $N1 = 4, N2 = 36, Q1 = 0.37, Q2 = 0.62$ であることがわかる。直接流出量は次式により計算される。

$$CQ = Q - QB \dots\dots\dots (11)$$

ここで CQ ：直接流出高 (mm/hr), Q ：流出高 (mm/hr), QB ：基底流出高 (mm/hr)。

降雨資料を直接流出高の分離開始点 $N1$ の前後で分離し、分離点 $N1$ 以前の総降雨量を初期損失雨量 FTR , $N1$ 以降の総降雨量を TR とする。総直接流出量 TCQ は次式で計算される。

$$TCQ = CQ(1) + CQ(2) + \dots + CQ(J) + \dots + CQ(JN)$$

$$J = 1, 2, 3 \dots, JN \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 TCQ ：総直接流出高 (mm), $CQ(J)$ ：直接流出高系列, JN ：直接流出高資料数。

表-4によれば、 $FTR = 5.0 (mm), TR = 102.0 (mm), TCQ = 20.196 (mm)$ であることがわかる。流出率 f は次式で計算される。

$$f = \frac{\text{総直接流量}}{\text{総雨量}} = \frac{TCQ}{TR} \dots\dots\dots (13)$$

表-4によれば流出率 $f = 0.198$ であることがわかる。有効雨量は分離開始点 $N1$ 以降の降雨資料に、一率に流出率 f を乗じて計算する。

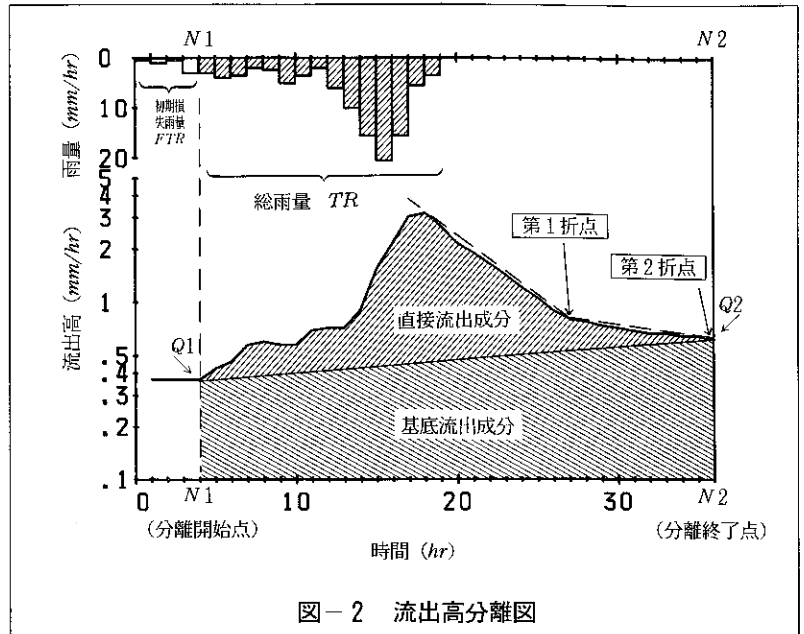


図-2 流出高分離図

表-4 直接流出成分, 有効雨量の計算

No.	Q 流出高 (mm/hr)	QB 基底流出高 (mm/hr)	CQ 直接流出高 (mm/hr)	R 雨量 (mm/hr)	有効雨量 (雨量×流出率) (mm/hr)
1	0.37	—	—	0.5	—
2	0.37	—	—	1.0	—
3	0.37	—	—	0.5	—
N1 [4]	Q1 [0.37]	0.370	0.000	3.0	—
5	0.42	0.378	0.042	3.0	0.594
6	0.47	0.386	0.084	4.0	0.792
7	0.57	0.393	0.177	3.5	0.693
8	0.60	0.401	0.199	2.0	0.396
9	0.57	0.409	0.161	2.5	0.495
10	0.57	0.417	0.153	5.0	0.990
11	0.70	0.425	0.275	3.5	0.693
12	0.72	0.432	0.288	2.0	0.396
13	0.72	0.440	0.280	6.0	1.188
14	0.91	0.448	0.462	10.0	1.980
15	1.54	0.456	1.084	15.5	3.069
16	2.16	0.464	1.696	20.5	4.059
17	3.05	0.472	2.578	15.5	3.069
18	3.19	0.479	2.711	5.5	1.089
19	2.67	0.487	2.183	3.5	0.693
20	2.16	0.495	1.665		
21	1.90	0.503	1.397		
22	1.65	0.511	1.139		
23	1.43	0.518	0.912		
24	1.21	0.526	0.684		
25	1.05	0.534	0.516		
26	0.90	0.542	0.358		
27	0.80	0.550	0.250		
28	0.78	0.557	0.223		
29	0.74	0.565	0.175		
30	0.72	0.573	0.147		
31	0.70	0.581	0.119		
32	0.67	0.589	0.081		
33	0.67	0.597	0.073		
34	0.65	0.604	0.046		
35	0.65	0.612	0.038		
N2 [36]	Q2 [0.62]	0.620	0.000		
			計20.196		
				計102.0	
				総雨量 TR = 102.0 (mm)	
					流出率 $f = \frac{TCQ}{TR} = \frac{20.196}{102.0} = 0.198$
					総直接流出量 TCQ = 20.196 (mm)

⑤ 有効雨量と直接流出高の整理 (図-3)

④で得られた有効雨量系列と直接流出高系列を図、表として整理する。この資料を以降に行う流出計算に用いる。

⑥ f_c 値の同定および流出計算

f_c 値の一次元探索を行い、最適 f_c 値の同定および流出計算を行う。パラメータの推定式(4)~(7)式中唯一の未知定数は f_c のみである。したがって f_c 値の初期値と f_c 値の増分 Δf_c を与えて、パラメータ k_1 と k_2 を全て決定して計算流量を求め、評価基準の(8)式の値を最小とするときの f_c 値を探索する。探索用のプログラムは次ページに示すが、入力が必要な変数はプログラムの行番号と対応させて次に示すので、参照されたい。なお f_c 値の初期値を 0.2, 増分 Δf_c 値を 0.1 程度に設定し、(8)式が最小値を示すまで探索を続けるのが確実である。また、繰返し回数 $NCASE$ は 30 程度とれば良い。

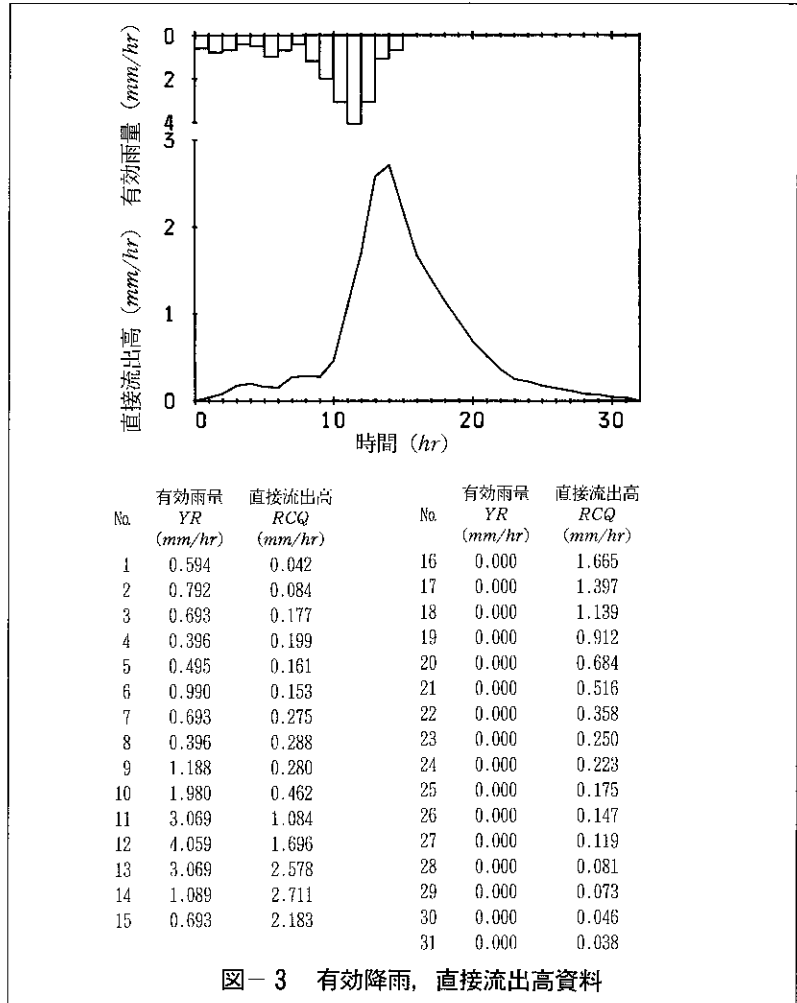


図-3 有効降雨, 直接流出高資料

行番号：入力変数の説明

40: f_c 値の探索回数 $NCASE$ の入力

60: 流域面積 AA (km^2) の入力

70: 有効降雨資料数 NR , 直接流出高資料数 NQ の入力

80: f_c 値の初期値 FC , f_c 値の増分 (Δf_c) DFC の入力

110~120: 有効雨量系列 $R(I)$ の入力 (作業④で得られた資料)

150~180: 直接流出高系列 $RCQ(I)$ の入力 (作業④で得られた資料)

220: 計算時間間隔 T (hr) の入力 (1/5 (hr) 程度でよい)

この計算例では $f_c = 1.33$ のとき(8)式の J が最小値をとっている。このときのパラメータ値は $k_1 = 6.3459$, $k_2 = 10.5520$ であることがわかる。

表-5 f_c 値の最適同定および流出計算出力例

KK	f_c	Δf_c	k_1	k_2	J
KK=1	FC=1.280	DFC=0.0100	K1=6.1073	K2=9.7736	J=0.4714
KK=2	FC=1.290	DFC=0.0100	K1=6.1550	K2=9.9269	J=0.4588
KK=3	FC=1.300	DFC=0.0100	K1=6.2028	K2=10.0814	J=0.4501
KK=4	FC=1.310	DFC=0.0100	K1=6.2505	K2=10.2371	J=0.4443
KK=5	FC=1.320	DFC=0.0100	K1=6.2982	K2=10.3940	J=0.4414
KK=6	FC=1.330	DFC=0.0100	K1=6.3459	K2=10.5520	J=0.4413 *
KK=7	FC=1.340	DFC=0.0100	K1=6.3936	K2=10.7113	J=0.4439
KK=8	FC=1.350	DFC=0.0100	K1=6.4413	K2=10.8718	J=0.4494

* 最小値

$NL = 5$							
$NR = 15$		$NQ = 31$					
$A = 8.900$		$RAVE = 1.346$					
$FC = 1.3300$							
$K1 = 6.3459$		$K2 = 10.5520$					
No	YR (mm/hr)	RCQ (mm/hr)	CCQ (mm/hr)	No	YR (mm/hr)	RCQ (mm/hr)	CCQ (mm/hr)
1	0.594	0.042	0.077	16	0.000	1.665	1.811
2	0.792	0.084	0.107	17	0.000	1.397	1.316
3	0.693	0.177	0.160	18	0.000	1.139	0.938
4	0.396	0.199	0.218	19	0.000	0.912	0.674
5	0.495	0.161	0.270	20	0.000	0.684	0.495
6	0.990	0.153	0.340	21	0.000	0.516	0.374
7	0.693	0.275	0.422	22	0.000	0.358	0.290
8	0.396	0.288	0.477	23	0.000	0.250	0.231
9	1.188	0.280	0.543	24	0.000	0.223	0.188
10	1.980	0.462	0.699	25	0.000	0.175	0.157
11	3.069	1.084	1.034	26	0.000	0.147	0.132
12	4.059	1.696	1.643	27	0.000	0.119	0.113
13	3.069	2.578	2.329	28	0.000	0.081	0.098
14	1.089	2.711	2.568	29	0.000	0.073	0.086
15	0.693	2.183	2.305	30	0.000	0.046	0.076
				31	0.000	0.038	0.068

⑦ 直接流出成分の再現図 (図-4)

⑥で得られた計算値を実測直接流出高に重ねて図化する。この作業により原洪水資料から分離された直接流出高と計算による直接流出高の適合度がわかる。

⑧ 洪水波形の再現 (図-5)

⑥で得られた計算値の直接流出高に④で求めた基底流出高を加える。さらに流出高 q を流量 Q に変換して原洪水資料と重ね合わせた図を作成する。計算流出高は次式により流量に変換される。

$$Q = (CQ + QB) \times A / 3.6 \dots\dots\dots (14)$$

ここで CQ : 計算直接流出高 (mm/hr),
 QB : ④で得られた基底流出高 (mm/hr),
 A : 流域面積 (km²)

以上の手順により実洪水資料の再現計算が行われた。

• f_c 値探索プログラムリスト

```

10 ' SAVE "10:KINEFRC", A
20 '
30 DIM X1(2), X2(2), R(50), RCQ(50), CCQ(50)
40 NCASE=10
50 P1=.6:P2=.4648
60 AA=8.9:'AREA KM^2
70 NR=15:NQ=31
80 FC=1.27 :DFC=.01
90 ' R DATA
100 FOR I=1 TO NR:READ R(I):NEXT I
110 DATA 0.5940,0.7920,0.6930,0.3960,0.4950,0.9900,0.6930,0.3960,1.1880
120 DATA 1.9799,3.0689,4.0588,3.0689,1.089,0.693
130 '
140 FOR I=1 TO NQ:READ RCQ(I):NEXT I
150 DATA 0.0422,0.0844,0.1766,0.1988,0.1609,0.1531,0.2753,0.2875,0.2797,0.4619
160 DATA 1.0841,1.6963,2.5784,2.7106,2.1828,1.6650,1.3972,1.1394,0.9116,0.6838
170 DATA 0.5159,0.3681,0.2503,0.2225,0.1747,0.1469,0.1191,0.0813,0.0734,0.0456
180 DATA 0.0378
190 FOR I=1 TO NR:SS=SS+R(I):NEXT I
200 RB=SS/NR:PRINT "RB=";RB
210 '
220 T=1/5:' CULCULATION STEP 1/5(HOUR)
230 T2=T*T:T3=T2*T:T4=T3*T
240 NL=INT(1/T+1E-03)
250 FCMIN=9999:JMIN=9999
260 FOR KK=1 TO NCASE
280 X(1)=0:X(2)=0:ER=0
290 FC=FC+DFC
300 K1=2.8235*FC*AA^.24
310 K2=.2835*K1^2*RB^-.2648:PRINT "K1,K2=";K1;K2
320 P3=P1/P2:K3=K1/K2
330 FOR J=1 TO NQ
340 Y1=X(1) :Y2=X(2)
350 FOR I=1 TO NL
360 GOSUB 1000:'SUBROUTINE GESTO
370 NEXT I
380 CCQ(J)=X(1)^(1/P2)
390 E=RCQ(J)-CCQ(J)
400 ER=ER+E^2
420 NEXT J
430 J=ER
440 IF J<JMIN THEN JMIN=J:FCMIN=FC:'PRINT "JMIN,FCMIN=";JMIN;FCMIN
450 LPRINT USING "KK=## FC=##.#### DFC=##.#### K1=##.#### K2=##.####
J=##.####";KK;FC;DFC;K1;K2;J
460 NEXT KK
470 '

```

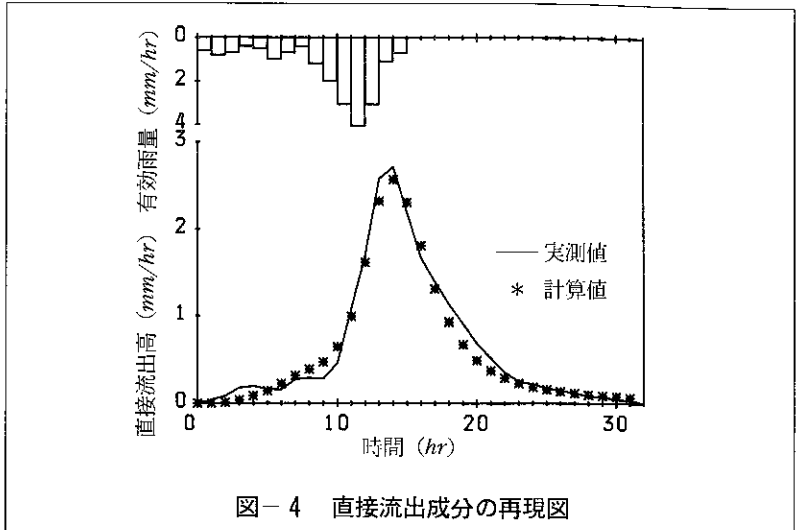


図-4 直接流出成分の再現図

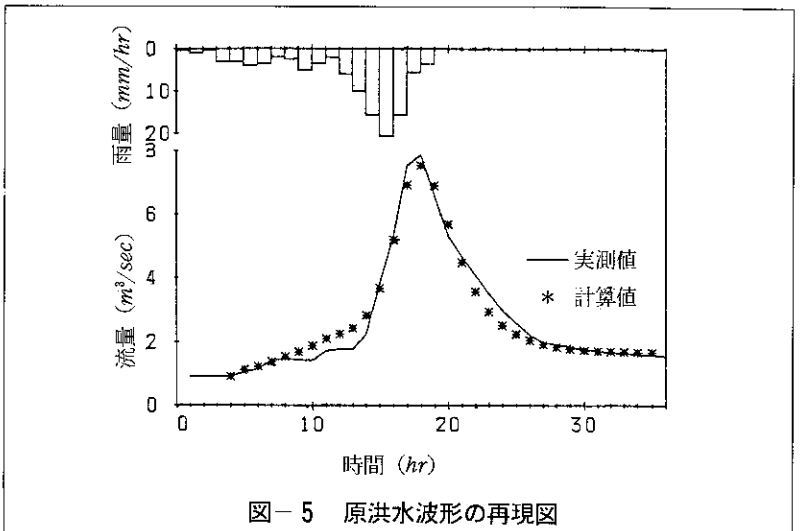


図-5 原洪水波形の再現図

```

480 FC=FCMIN
490 K1=2.8235*FC*AA^24
500 K2=-.2835*K1^2*RB^-.2648
510 P3=P1/P2:K3=K1/K2
520 FOR J=1 TO NQ
530 Y1=X(1) :Y2=X(2)
540 FOR I=1 TO NL
550 GOSUB 1000:'SUBROUTINE GESTO
560 NEXT I
570 CCQ(J)=X(1)^(1/P2)
580 E=RCQ(J)-CCQ(J)
590 ER=ER+E^2
600 NEXT J
610 J=SQR(ER/NQ)
620 GOSUB 640
630 END
640 ' OPTIMIZATION FC OUTPUT
650 LPRINT
660 LPRINT USING "NL=##";NL
670 LPRINT USING "NR=## NQ=##";NR;NQ
680 LPRINT USING "A=###.### RAVE=';AA;RB
690 LPRINT USING "FC=###.###";FCMIN
700 LPRINT USING "K1=###.### K2=###.###";K1;K2
710 LPRINT
720 LPRINT "NO YR RCQ CCQ"
730 LPRINT " (MM/H) (MM/H) (MM/H)"
740 FOR J=1 TO NQ
750 LPRINT USING "## ##.### ##.### ##.###";J;R(J);RCQ(J);CCQ(J)
760 NEXT J
770 RETURN
1000 'SUBROUTINE GESTO
1010 IF Y1=0 THEN GOTO 1060
1020 A=Y1^(P3-2)
1030 C=Y1^(1/P2-1)
1040 D=Y1^(P3-1)
1050 E=Y1^(1/P2)
1060 A1=-K3*P3*(P3-1)*A*Y2-1/K2/P2*C
1070 A2=-K3*P3*D
1080 A3=A1+A2*A2:A4=A1+A3
1090 B2=K3*P3*(P3-1)*D*Y2+1/K2*(1/P2-1)*E+R(J)/K2
1100 ' FAI MATRIX
1110 F1=1+.5*A1*T2+1/6*A1*A2*T3+1/24*A1*A3*T4
1120 F2=T*(1+.5*A2*T+1/6*A3*T2+1/24*A2*A4*T3)
1130 F3=A1*F2
1140 F4=1+A2*T+.5*A3*T2+1/6*A2*A4*T3+1/24*(A1*A3+A2*A2*A4)*T4
1150 ' GAMMA MATRIX
1160 G2=T2*(.5+1/6*A2*T+1/24*A3*T2)
1170 G4=F2
1190 Y(1)=F1*Y1+F2*Y2+G2*B2
1200 Y(2)=F3*Y1+F4*Y2+G4*B2
1210 Y1=Y(1):Y2=Y(2)
1220 FOR L=1 TO 2:X(L)=Y(L):NEXT L
1230 RETURN

```