

石狩川上流部双雲別の流出解析 (第1報)

水文研究会

正員 北海道開発局 上条俊一郎

1. ま え か き

石狩川上流部双雲別地点において、単位図法を用いて流出特性の解析を行なった。北海道の河川においては、その特殊性から、流出の機構と同じく、損失雨量の取り扱いについても適切な解析方法が要求されるが、この解析においても単位図に関する種々の問題、損失雨量の問題などを検討して上流域の特性を把握し、その取り扱いについてある程度の指針を得ることができた。

この解析を第一段階として順次改良を加える考えである。

この解析は水文研究会による協同研究の成果である。水文研究会は北大工学部および北海道開発局の有志をメンバーとする研究団体で、本文の作製に参加したのは筆者の他つぎの10名である。

北大工学部 岸 力 中尾欣四郎
北海道開発局 川島 雅 中田 瞭司 江利川喜一
土佐林 宏 内山 博 山口 甲
林 信雄 稲葉 誠一

2. 流域概況および資料

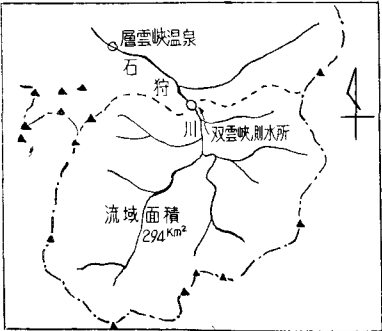


図-1 双雲別流域略図

2-1 流域概況

双雲別測水所 (北海道電力K.K.所有・通産省指定観測所)の流域は、図-1に示すもので、流域面積は294 km²である。流域は山地のみで、周辺を1,500 mから2,000 m以上の高山に囲まれ測水所 (標高720 m)を中心とする扇形を

なしている。林相は、昭和29年9月の15号台風により森林面積の30%にも及ぶ風倒木被害を受けたため、草地または灌木林を介在するが、残部は針葉樹を主体とする森林が発達している。地質は右岸に日高系の粘板岩、砂岩が広く分布し、左岸はそれを覆う火山噴出物、下部洪積層、段丘堆積物ならびに沖積層からなっている。

2-2 洪水資料

表-1

洪水番号	生 起 年 月 日	Peak 流量 (m ³ /sec)
No. 1	S 30. 7. 30	314.5
2	S 30. 8. 10	56.0
3	S 30. 8. 17	54.1
4	S 30. 8. 19	52.3
5	S 30. 8. 21	58.5
6	S 32. 9. 20	97.0
7	S 32. 10. 17	84.0
8	S 33. 7. 22	83.0
9	S 33. 7. 31	100.0
10	S 33. 8. 27	60.0

解析に用いた資料は表-1に示す10ヶの洪水である。そのうち昭和30年の洪水は、測水所下流約1 kmのところにある発電所の観測値を使用し、それ以外については双雲別観測所の観測値を使用した。洪水記録はすべて時間観測値である。

2-3 雨量資料

流域内には自記雨量の記録はなく、双雲別測水所の日雨量があるだけなので、近くの層雲峡観測所の時間雨量を用いて時間配分を行なった。双雲別日雨量と層雲峡日雨量との関係を見るとよい相関を示し、ほぼ1対1の対応関係がなり立つので、降雨当日の双雲別日雨量/層雲峡日雨量の値を層雲峡の時間雨量に乗じて流域平均時間雨量とした。

3. 流出単位図

3-1 直接流出量と基底流出量との分離

本研究では、洪水流出の解析を行なうものであるので、

降雨に直接関係のある表面流出と中間流出との合計すなわち直接流出をとりだした。直接流出と基底流出との分離には、2,3の方法が提案されているが、本研究ではつぎの方法によった。すなわち図-2の例に示すように、流量が増加し始める流出の始点から Peak 流量の時刻まで基底流出が一定値を保ち、その後は図-3の例による方法で求めた終点まで直線的に基底流出が増加するとするものである。図-3による方法とは、洪水のてい減部を半対数紙上にプロットすると例に示すような3つの直線A, B, Cを形成するが、それぞれ表而流出の減水、中間流出の減水および基底流出の減水を表わすと考えられているもので、B直線とC直線の交点をもって直接流出の終点とするものである。

3-2 初期損失雨量

図-2に示すように、直接流出が始まる前の降雨を、初期損失雨量として降雨量から除外した。各洪水の初期損失雨量は、表-2に示すように洪水 No. 1を除けばいずれも5 mmを超えない程度である。洪水 No. 1は初期流量が特に大きな例であり、初期損失量も特異例と考えるべきであろう。したがって双雲別流域の初期損失雨量は一般には0~5 mmと考えられる。

3-3 流出率および有効雨量

流出率は一般には降雨量のみの関数と考えられている。表-2によって流出率 f と双雲別降雨量との関係を調べる

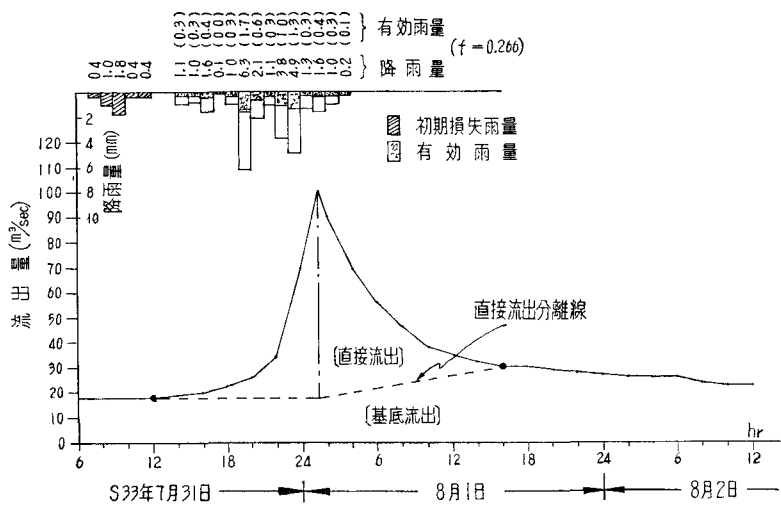


図-2 直接流出量と基底流出量との分離および初期損失の除去、有効雨量の算定例

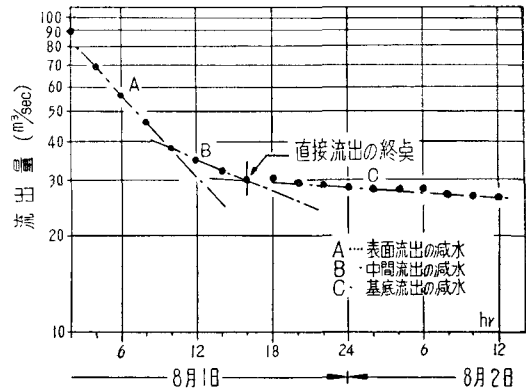


図-3 直接流出終点の決定例

表 - 2

洪水番号	直接流出の期間 (年・月・日・時)	流 出 高 (mm)	双雲別降雨量 (mm)	流出率 f	初期損失量 (mm)	初 期 流 量 (m³/sec)
No. 1	S 30・ 7・ 3・23~ 4・20	19.30	45.8	0.422	28.3	42.5
2	S 30・ 8・10・15~11・11	2.60	39.3	0.066	1.3	15.0
3	S 30・ 8・17・16~18・16	3.00	21.1	0.142	4.8	13.6
4	S 30・ 8・19・ 3~20・10	6.00	22.9	0.262	0	17.0
5	S 30・ 8・21・18~22・11	4.00	16.4	0.244	3.0	22.1
6	S 30・ 9・17・ 6~22・ 6	34.00	64.6	0.526	0	11.0
7	S 32・10・17・ 6~18・ 6	6.82	40.2	0.169	2.8	13.0
8	S 33・ 7・23・ 8~24・23	11.74	46.0	0.255	2.8	13.0
9	S 33・7・31・12~8・1・16	7.23	27.1	0.266	4.0	18.0
10	S 33・ 8・27・12~28・16	5.30	36.4	0.145	3.4	13.0

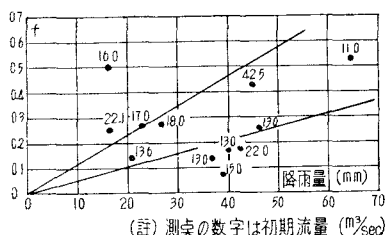


図-4 降雨量と流出率 f との関係

と図-4 のようになる。図-4 によれば、流出率は降雨量のみでは表わし得ないことが明らかである。この解析に用いた洪水のように、降雨量が比較的小さい場合には、降雨量のみでなく降雨初期における流域の湿潤の程度が流出率に大きな影響を及ぼしているためであろう。流域の湿潤の程度は、流出の初期流量の大きさによって代表されると考えられる。図-4 の測点を初期流量をパラメータとして整理すれば、図のように測点の間に一つの規則的な関係が認められる。図-4 によれば、初期流量が一定の場合、流出率は降雨量に対しほぼ一次の増加関数になっている。したがって流出解析に用いる有効雨量は、流出率を降雨量によって変化させながら各時間ごとに算出すべきことになる。しかし、流出率を時間ごとに変化させるのは計算を著しく煩雑にするので、本研究の解析では、表-2 の流出率 f の値を

流域平均時間雨量に乘じ毎時の有効雨量とした。図-2 にその算定例を示してある。

3-4 流出の単位図

3-3 の方法により算出した有効時期雨量は、層雲峡の時間分布をもととして算出されたものであり、流域平均雨量の実際の値とは多少差があるものと考えねばならない。しかし、日雨量の相関は、ほぼ 1 対 1 の対応関係にあるので降雨の継続時間を長くとることにより実際の値に近づくであろうと思われる。この意味で、解析には 2 時間雨量を用いることとした。

実測値と単位図より求めた計算値との比較例を数例図-5 に示した。ただ洪水 No. 6 については、降雨が 3 日間にわたって連続し流出も複雑であるので、図-5 に示した例と同程度の精度をもつ単位図を求めることはできなかった。この例については、第 5 章であらためて論じてある。

単位図の代表的な指標である Peak 流量と、Peak の遅れの時間とをとり出し、雨量強度との関係を調べると表-3 が得られる。表-3 によれば、Peak 流量の大きさ、Peak の遅れの時間は、いずれも降雨強度には関係しないようであり、Peak の遅れの時間は、ほとんどが 5~6 時間の値をもち一定しているように思われるが、単位図の Peak 流量は、 $Q_p=35 \text{ m}^3/\text{sec}$ から $Q_p=12 \text{ m}^3/\text{sec}$ と大きく異なっている。このことは、双雲別流域のような小流域においては

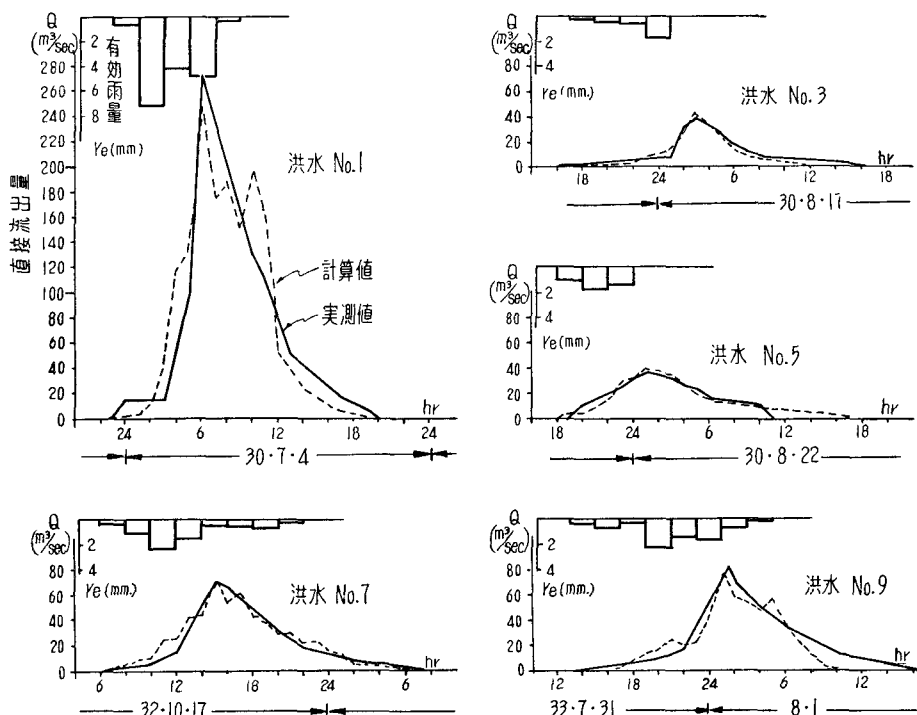


図-5 単位図から求めた計算値と実測値との比較

線形解析法を適用すれば、一ケの単位図では流出機構を表わし得ないことを示すものであろう。本研究では、単位図の変形に関する解析は後にゆずり、単位図を比較形的の似たいいくつかのグループに分け、それぞれのグループについて代表的な単位図を求めて解析を進めた。

表-3によれば、Peak 流量の大きさは、 $Q_p \div 30 \text{ m}^3/\text{sec}$ (1,9), $Q_p \div 20 \text{ m}^3/\text{sec}$ (2,3,7,8), $Q_p \div 15 \text{ m}^3/\text{sec}$ (4,5) の3つのグループに大別できる。Peak の遅れはほぼ一定であ

表-3

洪水番号	単位図の Peak 流 量 (m^3/sec)	Peak の 遅 れ (hr)	最大 2 時 間 雨 量 (mm)	Peak ま での時間 (hr)	Peak までの 平均有効 雨量強度 (mm/hr)
No. 1	30.0	5	7.2	8	2.40
2	19.0	7	1.8	6	0.43
3	19.0	4	1.8	8	0.38
4	12.0	5	2.2	6	0.62
5	15.0	5	1.7	6	0.67
6		6	2.6	28	0.15
7	24.0	5	2.3	10	0.56
8	20.0	5	2.3	16	0.69
9	35.0	6	2.3	12	0.53
10	20.0	6	1.5	16	0.33

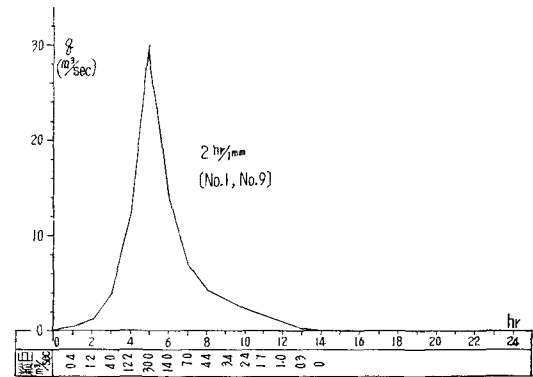


図-6-a 単位図 A type

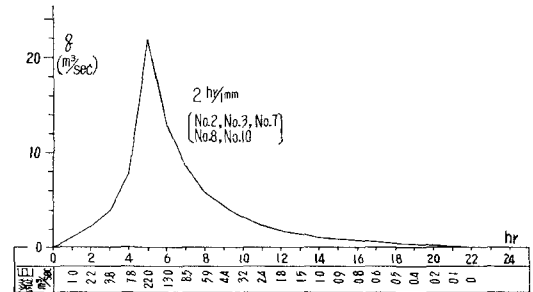


図-6-b 単位図 B type

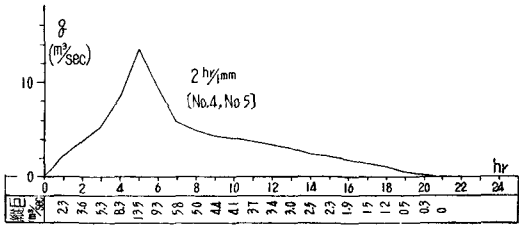


図-6-c 単位図 C type

るので、Peak の時刻を合わせて形を比較したところ、Peak 流量の値の似ている単位図は形も比較的良好に似ていることが認められた。そこで、それぞれのグループから代表的な単位図を求め(図-6 a~c)それぞれ A type ($Q_p=30 \text{ m}^3/\text{sec}$), B type ($Q_p=20 \text{ m}^3/\text{sec}$), C type ($Q_p=15 \text{ m}^3/\text{sec}$) の単位図とした。単位図は $2 \text{ hr}/1 \text{ mm}$ のものである。

3-5 単位図の適用条件

表-4

洪水番号	直接流出 の Peak 流 量 (m^3/sec)	Peak ま での有効 雨 量 (mm)	洪水番号	直接流出 の Peak 流 量 (m^3/sec)	Peak ま での有効 雨 量 (mm)
No. 1	272.0	19.2	No. 7	68.5	5.6
2	28.5	2.6	8	70.0	11.0
3	40.5	3.0	9	71.8	6.4
4	35.3	3.7	10	47.0	5.3
5	36.4	4.0	1'	298.0	23.0
6	59.0	34.0			

(註) 1' は初期流量を $22.5 \text{ m}^3/\text{sec}$ とみなした場合

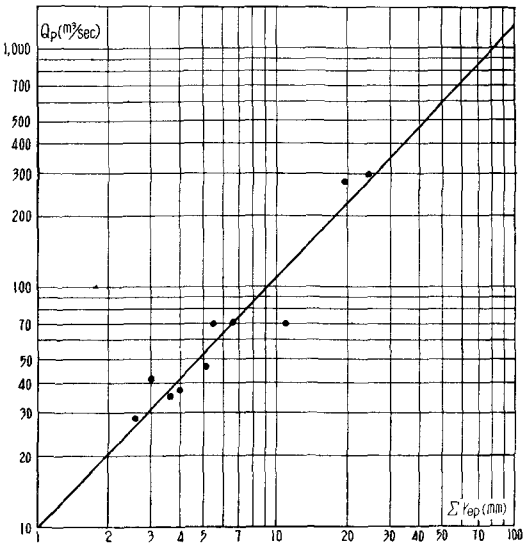


図-7 直接流出の Peak 流量 (Q_p) と Peak 時までの総有効雨量 (Σr_{ep}) との関係

本節では、3-4 で求めた 3 type の単位図の適用条件について考察する。

雨量と雨量強度とのいずれもが十分大きい場合には、単位図の Peak 流量は最大雨量強度に関係することが知られている。しかし、表-3 に表われた結果では、単位図の Peak 流量と、最大 2 時間雨量との間には相関関係は認められない。また Peak 時までの平均雨量強度との間にも相関関係は認められない。一般には Peak 流量に関係するのは、雨量強度のみでなく、Peak の時刻までに降った雨量全体が関係する。そこで、直接流出の Peak 流量と、Peak 時までの有効雨量の総和との関係を認めるために、表-4 を用意した。表-4 を両対数紙上に図示したものが 図-7 であり、双雲別では直接流出の Peak 流量は、Peak 時までの有効雨量の総和によって決まることがわかった。図-7 では $Q_p \propto (\sum rep)^{1.1}$ の関係になっている。

図-7 を用いれば、ある与えられた降雨に対していずれの単位図を用いるべきかが決まる。すなわち、図-7 で求めた Peak 流量に最も近い値を与える単位図を採用すればよい。

4. 損失雨量と流出率

3-3 においてすでにこの流域の流出率について述べ、観測値の範囲内では、流出率が総雨量と、初期流量との関数として表わされることを明らかにし、3 者の関数関係を図-4 に示した。しかし、計画雨量に対する流出を計算する場合など、雨量が観測値の範囲外になる場合には、流出率を外挿で求めることは困難であり、損失雨量の性質について別々の観点から考察することが必要である。

Horton その他の実験によれば、雨水の地中への浸透は (4-1) 式で表わされる。

$$f = f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt} \quad (4-1)$$

ここに

f = 浸透能 (mm/hr)

f_c = 浸透能の終値 (mm/hr)

f_0 = 浸透能の初期値 (mm/hr)

k = 浸透能の減衰係数 (hr^{-1})

t = 時間 (hr)

(4-1) 式を積分してある継続時間 t_d に対する総損失量 F (mm) を求めれば (4-2) 式となる。

$$F = f_c t_d + \frac{(f_0 - f_c)}{k} (1 - e^{-k t_d}) \quad (4-2)$$

流域の損失雨量が (4-2) 式の形式にしたがうかどうかを調べるため、降雨の継続時間と損失雨量との関係を 表-5 に示した。

表-5 を図示すれば 図-8 のようになる。図-8 によれば、観測値の配列は (4-2) 式で表わされる傾向を示している。

表-5

洪水番号	降雨継続時間 (hr)	損失雨量 (mm)	初期流量 (m^3/sec)
No. 1	14	26.5	42.5
2	11	36.7	15.0
3	17	18.1	13.6
4	29	16.9	17.0
5	17	12.4	22.1
6	105	30.6	11.0
7	16	33.4	13.0
8	23	34.3	13.0
9	16	19.9	18.0
10	16	31.1	13.0

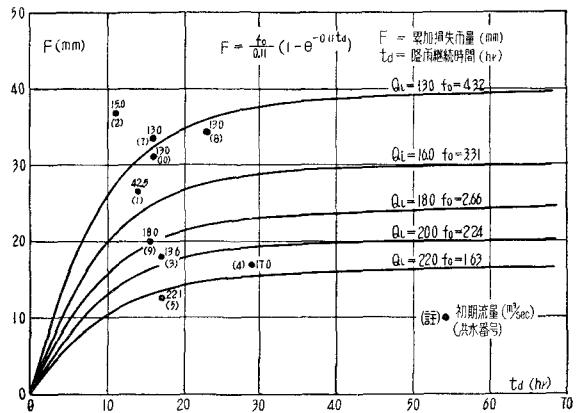


図-8 降雨継続時間 (t_d) と累加損失雨量 (F) との関係

観測値に最もよく適合するように (4-2) 式の常数を決めた結果、 $f_c = 0$ 、 $k = 0.11$ となった。したがって双雲別流域では (4-2) 式は簡単になり

$$F = \frac{f_0}{0.11} (1 - e^{-0.11 t_d}) \quad (4-3)$$

となる。 f_0 の値は初期流量によって異なり、数値は 図-8 に与えてある。

図-8 によれば、損失雨量は降雨の初めに大きく、20~30 時間経過した後ではほとんど 0 に近くなる性質をもつことがわかる。

5. 連続する降雨による流出の解析

単位図はもともと孤立降雨による流出を対象にして発展してきた方法であり、一つの降雨による流出が終わらないうちに次の降雨があって流出が非常に長期にわたる場合には単位図の適用が困難とされている。今回扱った洪水においても、洪水 No. 6 がその好例であって、流出量計算の精度

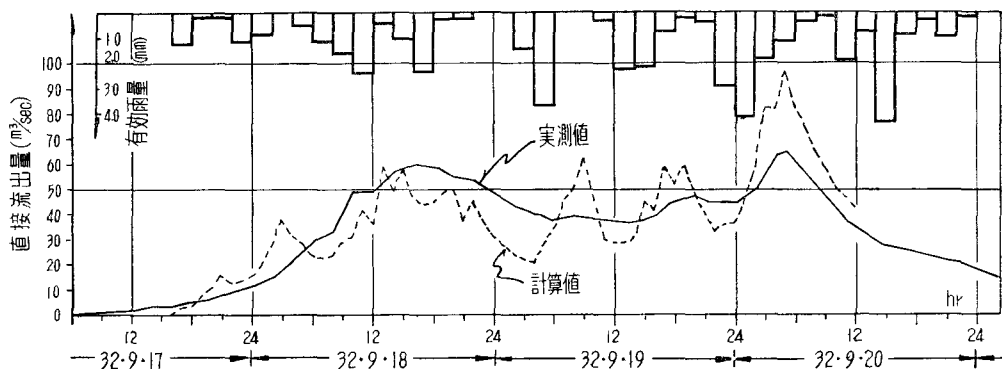


図-9 連続降雨における単位図の適用例

は他の洪水に比べて著しく劣っていた。その原因は、洪水 No. 6 のように降雨の経続時間が非常に長い場合は、流出率が一定であると仮定して求めた有効雨量が実際と相違している点にある。降雨が比較的短い時間に集中する一般の場合には、流出率を一定と仮定しても大差ないが、降雨が長時間にわたって分散する例では、流出率の変化を考慮すべきことはむしろ当然であろう。4 に述べたことは、その流出率変化の考察であり、図-8 を得たが、その考察の結果を調べる意味で洪水 No. 6 について流出量を計算した。まず 図-8 から毎時の累加損失雨量を求める。ついで各 1 時間内の損失雨量を算出し、双雲別時間雨量から引けば、得られた数値は有効雨量を示す。しかし、図-8 は損失雨量についての平均的な関係を示すものであり、降雨の分布形についての影響は含まれていないので負値を生ずる場合がある。そこで、負値を正值の大きさに応じて比例配分し、

有効雨量の補正值とする。このようにして求めた有効雨量

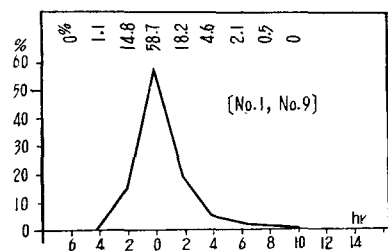


図-10-a 流量配分図 A

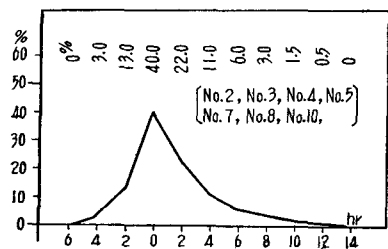


図-10-b 流量配分図 B

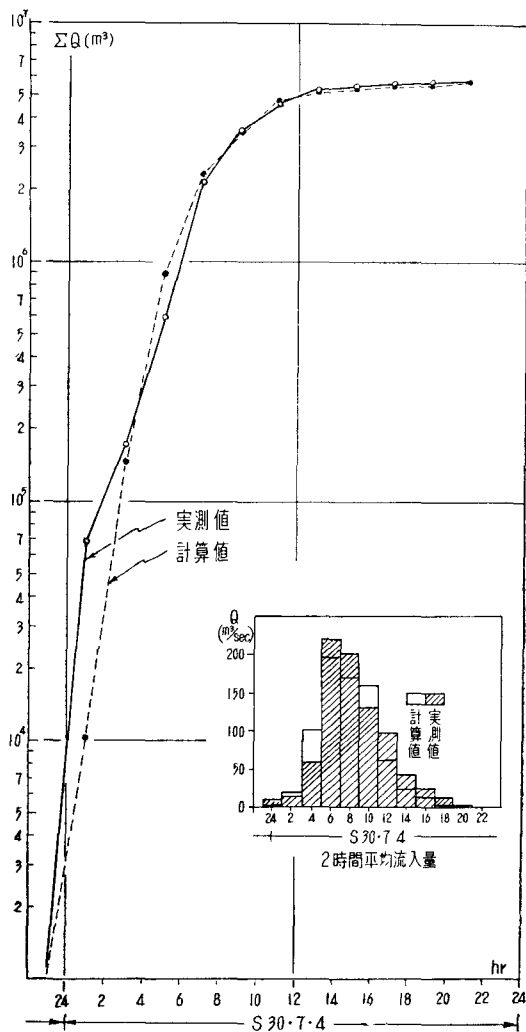


図-11 配分図 A より求めた流量累加曲線と実測値との比較

を、単位図 C type に適用して得られたものが、図-9 に示したものである。降雨が長時間にわたり、しかもその分布が非常に複雑であるにもかかわらず、実測値と計算値はかなりよく一致している。

損失雨量の算出、代表単位図の設定が、双雲別流域の降雨流出に対し当を得たものであることが、この例によっても認められると思う。

6. 流量配分図

タム計画などの場合、ある継続時間内の流入総量を求めるには、流量配分図によると便利なので、配分図を作成した。まずおのおのの単位図から2時間ごとの流量配分図を求め、Peak を重ねて比較すると、単位図の場合と同じく、配分図も Peak の値に似たものは形がよく似ていることが認められた。そこで、それぞれのグループから代表的な流量配分図として図-10 の配分図 A、および配分図 B を求めた。

結果として、配分図 A には単位図 A type に含まれる事例ががい当し、配分図 B には単位図 B type、C type の事例ががい当している。

配分図によって流量累加曲線の実測値と、計算値とを比較したものが図-11 である。この例は配分図 A より求めたものであるが、図に見られるとおり、流入総量を概算するには配分図を利用することができる。

7. 結 論

双雲別流域では、流出を一つの単位図では表わし得ない。解析に用いた資料の範囲内でも少なくとも3種の単位図を考える必要があり、その適用について Peak までの有効雨量の総和と、直接流出の Peak 流量との関係を利用することができる。

Peak までの有効雨量の総和 ($\sum r_{ep}$) と、直接流出の Peak 流量 (Q_p) との間には相関関係がなり立ち、双雲別流域では、 $Q_p \propto (\sum r_{ep})^{1.1}$ である。

損失雨量は、流出の初期流量をパラメーターとする降雨継続時間の関数で表わすことができ、双雲別流域では、 $F = \frac{f_0}{0.11} (1 - e^{-0.11ta})$ の式が適合する。ただし F は降雨の継続時間 t_a に対する総損失量 (mm)、 f_0 は浸透能の初期値 (mm/hr) であり、この方法による損失雨量の算定は、長期にわたる複雑な降雨の場合にも比較的よく適合する。