浦白川流出試験地における流出係数・流出率の変化

著者	木下 武雄
雑誌名	国立防災科学技術センター 研究報告
巻	27
ページ	13-24
発行年	1982-03
URL	http://doi.org/10.24732/nied.00000856

国立防災科学技術センター研究報告　第27号　1982年3月

556.16

浦白川流出試験地における流出係数・流出率の変化

木下武雄*

国立防災科学技術センター

Changes of Runoff Coefficients and Runoff Ratios in the Urajiro-gawa Experimental Basin

By

Takeo Kinosita

National Research Center for Disaster Prevention

Abstract

Changes of runoff coefficients and runoff ratios are analyzed by using data of the Urajiro-gawa experimental basins in Chiba Prefecture. The time of concentration at Tsukizaki Station (the drainage area is 8.6 km^2) is found to be about 80 minutes, while that at Kakinokidai Station (0.15 km^2) is about 30 minutes. The values of the time of concentration are listed in Tables 1 and 2. The runoff coefficient of the rational formula is about 0.4 in both stations as shown in Figs. 2 and 3. The runoff ratio during stationary rainfalls is about 0.6 in Figs. 4 and 5, though it is reduced when rainfall breaks, as shown in Fig. 8. Fig. 6 illustrates an interesting fact that the runoff ratio rapidly rises when a heavy rainfall suddenly occurs. Fig. 7 indicates how much the runoff ratio increases with increase of the accumulated rainfall. These results are very important for designing structural countermeasures against heavy rainfall disasters and for issuing forecasts of floods. The author would like to obtain more accurate results for prevention against rainfall disasters by collecting more general data.

*第1研究部

1. まえがき

洪水防御の構造物を作る際に想定する設計外力としての計画高水のとり方については，古来，いろいろな考え方によっている．全国一律に数値を与えたり又既往最大値をとったりしたが，現在は降雨についての超過確率年を決めて流量に換算する手法が一般的で，この考え方は鉄道や道路の雨に対する防災対策にまで普及しつつある．その確率年がどんな値であるかは木下(1980)が一覧表にまとめた．しかしその場合，確率年が決まり雨量が決まったてしても流出係数が決まらなければ設計外力とはならない．この流出係数については物部(1933)が発表したものがあるが，その後，明確な改訂などは行なわれておらず，アメリカで用いられている値が紹介されている程度である．(土木学会(1971))．構造物のみならず，いわゆる非構造的な洪水対策においても降った雨の何%が洪水として河道へ出て来るかは重大な情報である．残りの水は地中へ浸透し，それが時間を経て流出して干ばつに役に立つわけで，どのような割合で流出するかは洪水対策は勿論，干ばつ対策についても大切な内容で，流出率や流出係数の実態の解明は大へん重要である．

このようなことを研究するには，利根川とか淀川とかの実河川で実施すべきであろうが，観測のむずかしさと共に，人為的開発の影響を強く受けるので，その影響があまりなく，かつ流量の測りやすい比較的小さい流域において集中的に研究するという手法が用いられることがある．他方，小流域での結果は大流域には適用できないという意見もある．しかし，流域に雨が降って河道へ流出するまでの過程の途中におけるチェックポイントという意味及び最近小流域での雨に対する防災対策が重要になって来たことで，ここに小流域の流出現象を解析しようというものである．

小流域の流出には種々の見解があるようである．青木(1972)は裏筑波試験地等で洪水流出率はあまり大きくはないことを示しているし，岡本(1981)も相俣小試験地でいわゆる表面流出は136mm／h の散水実験でも発生しなかったと述べている．小流域の流出は諸外国でも注目され，1975 年にFlash　FloodのシンポジウムがユネスコとＩＡＨＳとで開かれたし，中国の黄河流域でも土砂生産とあわせて小流域からの流出が研究され，流出率が短時間の場合大きいと報告されている．木下(1981)．また木下・中根(1977)が行った実験斜面での降雨実験では土壌層が不飽和のまま表面流出が発生していることも観察された．

流出モデルは水文学で近年大いに発展した分野であるが，主として大きな流域において流出成分という形で雨量を分離し，流出や浸透の成分が雨量や貯留量の関数という形で表わされるように定義づけられている．例えば菅原(1956)・(1972)はタンクモデルにおいて河道へ流れ出す成分をタンクの横穴からの流出であらわし，それ以外はタンク内に留まるか，あるいは下段タンクへ浸透して行くモデルを作った．貯留関数では仮想斜面上に貯留された水量の関数として流出を計算し，雨量と流出との差が貯留分の増分と定義している．(木村

(1961～1962)).流出モデルはこの他にも各種のものが提案されており，百家鳴争の感があるが，木下(1967) はいろいろな流出モデルの相互比較を行ってそれらの共通点と相違点を指摘している．

ここでは流出モデルとは簡単な対応を考察するにとどめ，流出データから流出の実態を解析することに重点をおくものである．平たく言えばどこから洪水は流れてくるかということである．小流域の流出は地形・地質の条件に強く制約されるもので，A小試験流域からの結論とB小試験流域からの結論が矛盾することもあるかもしれない．しかし，利根川や淀川などの大流域からの流出にしても，基本的な共通点もあるのではないかと期待している．

2. 小試験流域

防災センターで観測している小試験流域は千葉県市原市月崎にある養老川水系浦白川である．この付近の地質は一般に上総層郡に属する．試験地の地質は主として第四紀更新世古期の国本層と呼ばれる泥岩で，下部は砂岩・泥岩の互層から成る．上流の一部には梅ヶ瀬層があって，砂岩・泥岩の互層である．この中に幾つかの水位観測所があるが，この報告でとり上げたものは観測所名月崎，流域面積8.6 K ㎡，柿ノ木台，同0.15K㎡の2箇所で図1に位置をA，Bで示す．月崎では右岸の護岸の他は自然のままの河道であるが，柿ノ木台には鉄製測定堰が設けられてある．水位測定には水研62型自記水位雨量計を用いている．資料は1975年より1979 年までにえられたものが防災科学技術研究資料48号(1980) としてすでに印刷されている．なおこの試験流域での観測値を岸井(1978) が流域面積の大小の関係等から解析して報告している．

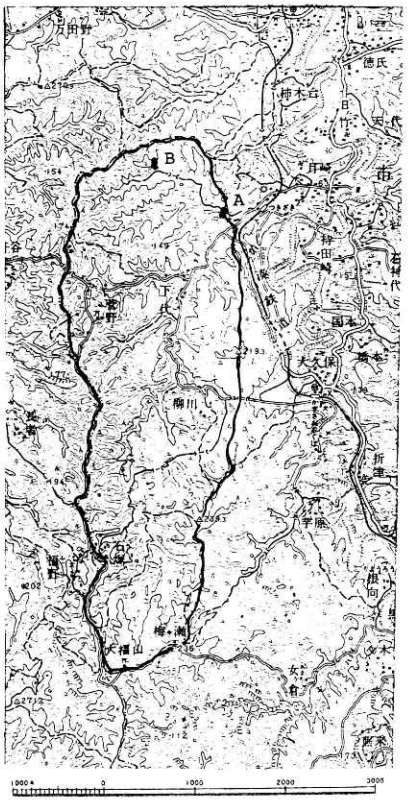


図 1 流域図(国土地理院 5万分の1地形図大多喜より) A：月崎観測所，B：柿ノ木台観測所

Fig. 1 Location map of the U-rajiro-gawa experimental basin.
A: Tsukizaki Staion
B: Kakinokidai Station.

3. 解析と考察

資料48号では雨量・水位等を10分刻みで作成してある．従って，例えば，8時30分の10分雨量が5mmということは8時20分から同30分までに，0.5mmで一回転倒する転倒ます雨量計で5mmが計られたという意味である．流出は瞬時値とし

ての水位から水位流量曲線によって流量に変換してえられたものを流域面積で割り，単位を雨量と揃えたものである．

(1)　ピーク雨量からピーク流出までのおくれ時間

雨量は変動が激しくピークを決め難いが，前後の関係からピーク流出時刻の少し前の極大１０分雨量をピーク雨量とした．例えば8時２０分から8時３０分までの５mmが極大なら8時30分をピーク雨量発生の時刻とする．ピーク雨量からピーク流出までのおくれ時間は，一定の速さで雨水が流下すると仮定した時，流域の重心に降った雨が流量観測所へ流出してくるまでの時間と解され，合理式（次節）にも用いられる重要な流域の特性値である．水位雨量計は水位と雨量が同一紙上に記録されるのでおくれ時間の測定精度が高いので，水位雨量計で測られた月崎雨量，月崎流出を対応して調べる．柿ノ木台についても同じである．

(A)　月崎

表1のようにまとめられたおくれ時間の算術平均は３３分，これに時刻区切りが１０分であることを考慮して5分を加え，３８分となる．流路長を7,400m としてこの$\frac{1}{2}$を38分で割ると流出速度は1.62ｍ／s となる（１／２については次節参照）

(B)　柿ノ木台

表2のようにまとめられたおくれ時間の算術平均は8.7分，これに(A)と同じく5分を加え，13.7分となる．流路長を660ｍとしてこの１／２を13.7分で割ると0.40m／sとなる．

(C)　両者の比較

柿ノ木台は月崎より斜面の占める比率が大きいので柿ノ木台のおくれ時間が相対的に大きい．もし，月崎の流路長の上流端に柿ノ木台の流域がついていたと仮定して，単純に残りを河道としてこれらのおくれ時間の差から河道を伝播する速さを求めると，

$$\frac{7400\,\mathrm{m}/2-660\,\mathrm{m}/2}{38\text{分}-13.7\text{分}}=2.31\,\mathrm{m}/\mathrm{s}$$

となる．月崎の水位流量曲線より水位２ｍのときの流量１９㎥／ｓをその時の断面積1.5×5.5㎡で割ると，流速は

$$\frac{19\,\mathrm{m}^3/\mathrm{s}}{1.5\times5.5\,\mathrm{m}^2}=2.3\,\mathrm{m}/\mathrm{s}$$

となる．月崎の上流で流路は細くなるので2.3ｍ／ｓより流速はおそくなることと，波形伝播としての洪水伝播速度が流速の1.4倍程度になることが相殺してこのように一致したのであろう．

(2)　合理式の流量Q_p（㎥／ｓ）

洪水ピーク流量Q_p（㎥／ｓ）の推定式として，次に述べる合理式がしばしば用いられる．

表　1　月崎における雨量・流量のピーク及び流出係数

Table 1　The table shows the time and the amount of the rainfall peak and the discharge peak and the time difference between them, T, observed at Tsukizaki. RC means the runoff coefficient which is derived from Q_p and R_{80} (the rainfall within 80 min).

年　月　日	雨量ピーク発生時刻	雨量ピーク mm／10分	流量ピーク発生時刻	Q_p m³／s	雨量R_{80} Q_pの前80分	Q_p前の6時間の雨量	Qmm／h	流出係数 RC	おくれ時間 T
1975　10.5	17:30	12.5	18:00	22.22	58	66.5	9.31	0.214	0:30
〃　11.7	10:30	12.5	10:50	20.61	27	51.0	8.64	0.426	0:20
1976　11.18	8:40	6.0	9:20	10.67	15.5	32.5	4.47	0.385	0:40
1977　9.19	8:10	5.5	8:40	13.96	23.0	59.5	5.85	0.339	0:30
〃　9.19	17:30	6.0	17:50	31.18	34.5	79.5	13.06	0.505	0:20
〃　9.30	5:50	4.0	6:20	12.40	22.0	47.5	5.20	0.315	0:20
〃　11.17	5:00	16.5	5:30	50.95	61.5	104.0	21.35	0.463	0:30
1978　6.23	10:40	3.5	11:20	11.58	13.0	52.5	4.85	0.498	0:40
1979　4.8	22:20	4.5	22:40	14.97	24.5	57.5	6.27	0.341	0:20
〃　8.30	0:30 0:40	4.0 4.0	1:20	10.50	14.5	46.0	4.40	0.405	0:45
〃　10.7	12:30 12:40	3.5 3.5	13:00	25:08	24.5	76.5	10.51	0.572	0:35
〃　10.19	1:50	5.0	2:30	13:66	16.0	32.5	5.72	0.477	0:40
〃　10.19	13:30	6.0	14:20	29:41	36.0	70.0	12.32	0.456	0:50
〃　11.11	2:00 2:10	3.0 3.0	2:50	15:82	18.5	53.0	6.63	0.478	0:45
〃　11.28	23:20	10.0	23:50	43:59	47.5	87.5	18.26	0.513	0:30
平　均								0.4258	0:33

表　2　柿ノ木台における雨量・流量のピーク及び流出係数

Table 2　The table shows the time and the amount of the rainfall peak and the discharge peak and the time difference between them, T, observed at Kakinokidai. RC means the runoff coefficient which is derived from Q_p and R_{30} (the rainfall within 30 min.).

年	月・日	雨量ピーク発生時刻	雨量ピークmm／10分	流量ピーク発生時刻	Q_p 1／s	雨量R30 Qpの前30分	Qp前の6時間の雨量mm	Qmm／h	流出係数 RC	おくれ時間 T
1976	11.18	8：40	5.0	8：50	362.47	11.0	35.0	8.699	0.395	0：10
〃	10.9	15：20	2.5	15：30 15：40	145.31	5.0	41.5	3.487	0.487	0：15
〃	〃	14：10	3.5	14：20	156.71	6.0	29.0	3.761	0.313	0：10
1977	3.24	8：10 20	2.0 2.0	9：00	156.71	4.0	34.0	3.761	0.470	−
〃	3.27	9：30	3.0	9：20 9：30	156.71	7.0	25.5	3.761	0.269	−0：05
〃	6.25	6：50	3.0	7：00	168.42	6.0	31.5	4.042	0.337	0：10
〃	8.19	3：40	9.0	3：50	1235.19	19.5	73.5	29.645	0.760	0：10
〃	8.23	8：10	1.5	8：30 8：40	134.24	2.5	31.5	3.222	0.644	0：25
〃	9.8	20：10	9.0	20：20	2315.6	19.5	35.0	5.557	0.142	0：10
〃	9.19	8：20	6.0	8：30	394.33	13.5	64.5	9.464	0.351	0：10
〃	9.19	14：30	3.0	14：40	218.35	8.0	34.5	5.240	0.328	0：10
〃	9.19	17：30	5.5	17：30 17：40 17：50	410.61	13.0	73.0	9.855	0.379	−
〃	11.17	5：10	18.0	5：20	1138.68	34.0	97.5	27.328	0.402	0：10
1978	3.28	16：00	3.5	16：30	145.31	8.5	32.5	3.487	0.205	−
〃	4.3	8：20	4.0	8：30	175.61	7.0	33.5	4.215	0.301	0：10
1979	9.30	21：00	5.5	21：00	245.05	13.5	15.5	5.881	0.218	0
〃	10.7	12：30	5.0	12：30 12：40	460.86	9.5	77.0	11.061	0.582	0：05
〃	10.19	1：50	5.5	1：50	3165.2	14.5	32.0	7.596	0.262	0
〃	〃	13：30	7.0	13：50 14：20	474.61	10.0	70.5	11.391	0.570	−
〃	11.11	1：50 2：00 2：10	2.5 2.5 2.5	2：30	180.46	7.0	50.5	4.331	0.309	−
〃	11.28	23：10	10.0	23：10 ↓ 50	349.91	12.5	88.0	8.326	0.333	−
平均									0.3837	0：086

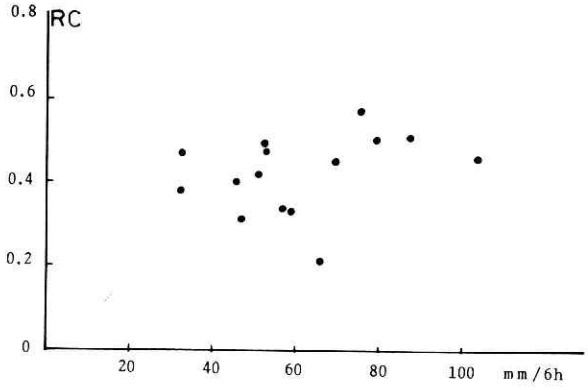


図　2　月崎における流出係数－6時間雨量

Fig. 2　Runoff coefficient (RC) and 6-hr rainfall at Tsukizaki Station.

$$Q_p = \frac{1}{3.6} f\ r\ A$$

ここにｆ：流出係数，ｒ：洪水到達時間内の雨量強度ｍｍ／ｈ，Ａ：流域面積ｋ㎡である．この式は降雨災害防止のための諸施設の設計に使われる．例えば下水道の雨水排除計画や，鉱さい堆積場の排水路設計などである．実際の値はどうなるかをみよう．洪水到達時間とは最遠点から流量観測所まで洪水が到達する時間で，ピークのおくれ時間は流域重心から流量観測所までの時間であるから，前者の１／２である．（木下(1974)）．

(A) 月崎

流出係数ｆを求めるに当り前節によるピークのおくれ時間の２倍に当る８０分を到達時間としてとった．結果は表１に示す．流出ピーク発生前６時間の雨量に対する関係は図２の通りで，６時間雨量が増すといくらかｆも増す傾向にある．表１の値を単純に算術平均するとｆは0.426となる．

流出ピーク発生前２時間の雨量を利用して同様の手順に拠りｆを求めると値は大きくなるのは勿論だが変動の幅が狭くなる．雨量観測値のバラツキの平均化のためであろう．

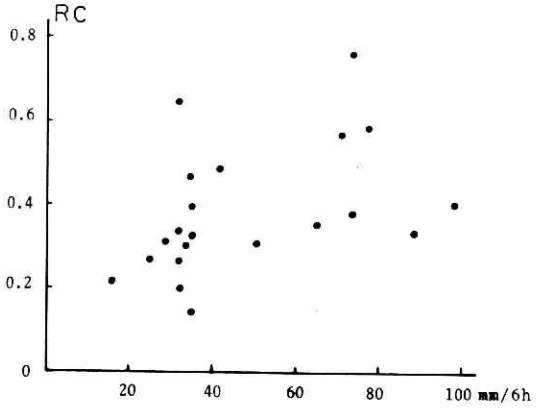


図　3　柿ノ木台における流出係数－6時間雨量

Fig. 3　Runoff coefficient (RC) and 6-hr rainfall at Kakinokidai Station.

(B) 柿ノ木台

fを求めるに当り前節によるピークのおくれ時間の2倍に当る30分を到達時間としてとった．結果は表2に示す．流出ピーク発生前6時間の雨量に対する関係は図3の通りで，6時間雨量が増すといくらかfも増す傾向にある．表2の値を単純に算術平均するとfは0.384となる．

流出ピーク発生前60分の雨量を利用して同様の手順に拠りfを求めると値は大きくなるのは勿論だが，月崎と同様変動の幅が狭くなる．

(3) 一定強度の持続性降雨に対する流出率

一定強度で降りつづく雨は存在しないし，観測も転倒ます雨量計によるため十分には行

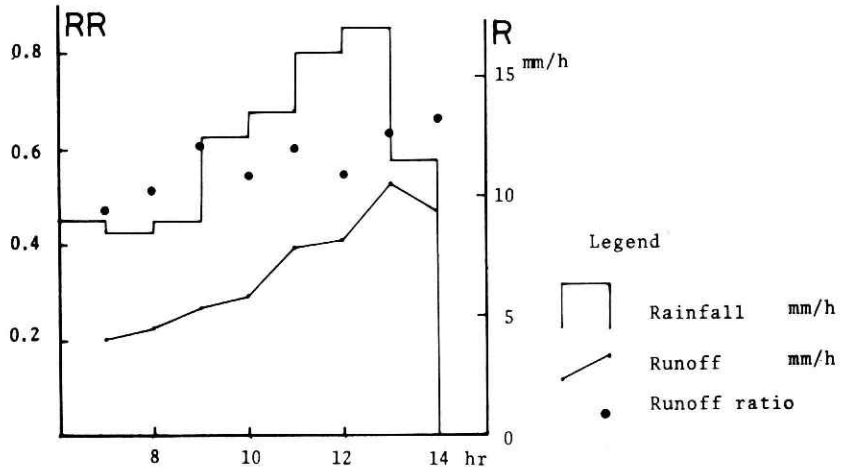


図　4 仮流出率の変化（月崎）（凡例は図5, 6, 8にも適用する）

Fig. 4 Runoff ratio (RR) for stationary rainfall (R) at Tsukizaki Station. The legend is available to Figs. 5, 6, & 8.

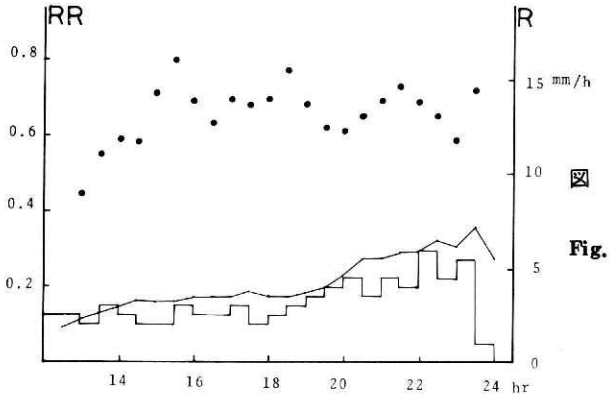


図　5 仮流出率の変化（柿ノ木台）（雨量は30分毎の観測値）

Fig. 5 Runoff ratio (RR) for stationary rainfall (R) at Kakinokidai Station. (Rainfall is in mm/30min).

えないので，一定強度の持続という言葉を厳密には解さないでほしい．洪水到達時間よりはるかに長い時間あまり変動せずに続く雨のことを指す．ここで一般に時刻tの流出（mm／h）をQ(t)，時刻t'からtまでの雨量強度（mm／h）をR(t',t)と書く．本節で用いる仮流出率はQ(t)／R(t－2Tc，t)と決める．ここにTcは洪水到達時間である．また通常，流出率は$\int_{t_1}^{t_2}Q(t)\,dt / \int_{t_1}^{t_2}R(t)\,dt$で定義されるので，ここで言う仮流出率は若干ちがっている．作業としては月崎では毎時のtに対しQ(t)／R(t－2時間，t)とし，柿ノ木台では毎30分のtに対しQ(t)／R(t－1時間，t)とする．

(A) 月崎(1979年10月7日9時～13時)

雨量強度は約15mm／hで図4に示すように，仮流出率は約0.6である．

(B) 柿ノ木台(1977年3月30日13時～24時，1979年10月7日9時～13時)

雨量強度はそれぞれ約5mm／h，15mm／hで，前者を図5に示す．両方とも仮流出率は約0.6である．

(C) 両者の比較

定常状態と解すれば月崎流域の一部が柿ノ木台であるから共に0.6が得られても不思議はないが，前節で求められたピーク流出に対する流出係数に比べて大きい値である．つまり長雨が続くと流出率は0.6程度になりうるし，もっと大雨が降ればさらに大きな流出率で洪水が発生するかも知れない．この場合の流出Qには中間流出あるいは地下水流出までが含まれていると解されるが，観点を変えれば，継続的に降っている雨の40％は土中水分の増加になっているのであり，後で相当量の浸透する能力を残しながら60％流出しているとも言える．

(4) 雨の降りはじめてからピークまでの到達時間流出率

雨が降りつづくと流出率は徐々に増して行く．ここで言う到達時間流出率とはQ(t)/R(t－Tc，t)と決める．これはピーク流量に対しては合理式の流出係数に等しい．作業としては月崎では毎時のtに対しQ(t)／R(t－1時間，t)とし，柿ノ木台では毎30分のtに対しQ(t)／R(t－30分，t)とする．

月崎・柿ノ木台の双方の結果をとりまぜて

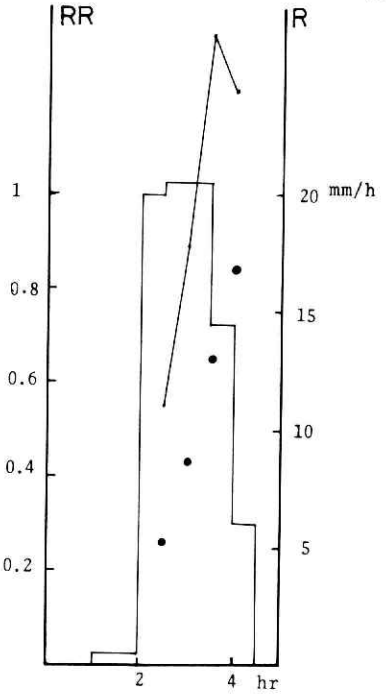


図 6 到達時間流出率の急激な増加例（雨量は30分毎の観測値）

Fig. 6 Rapid rise of the runoff ratio (RR) due to suddenly occurring rainfall (R). (Rainfall is in mm／30min.)

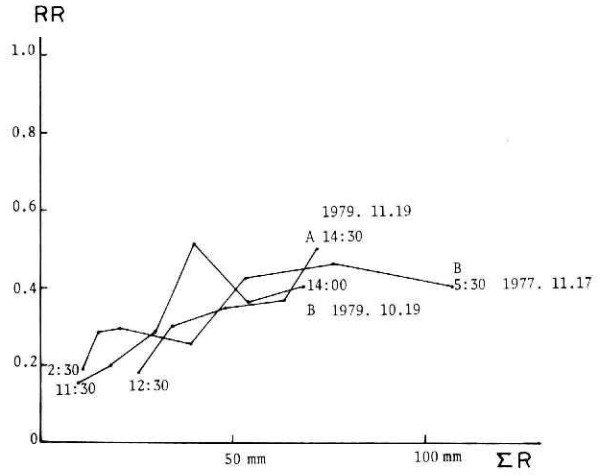


図　7　到達時間流出率の累加雨量に対する変化

Fig. 7　Runoff ratio (RR) and accumulated rainfall (Σ R).

考察する．

(ア)　急に一定強度の雨が降り出した場合．(1977年8月19日2時～4時，柿ノ木台) 図6参照

到達時間流出率は時間の経過と共に直線的に増す．最後には41mm／hの雨に対し26.76mm／hの流出で流出率0.65となる．この場合，最初の30分に降った40mm／hに対しても11.06mm／h の流出が観測されたことには注目してよいだろう．

この後の1時間半に雨量－流出として求めた浸透が42mmに達しているところをみても，11.06mm／hの表面流出があって，土中水分は不飽和の状態であろう．タンクモデルでは

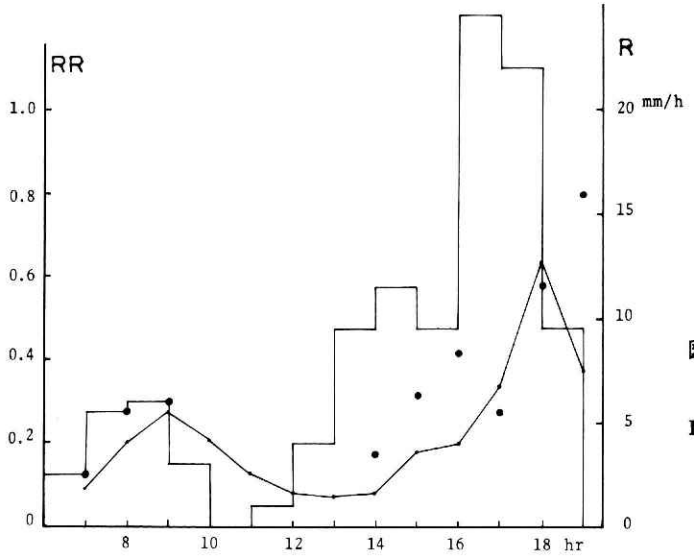


図　8　雨が止んだ時の到達時間流出率

Fig. 8　Change of the run-off ratio (RR) in the case of break of rainfall (R).

第1段タンク横穴がかなり低く，大きい係数を持つことに対応している．

(イ) 徐々に雨量が増して到達時間流出率の増す例．

1977年11月17日　3時～6時　月崎，

1977年11月17日　3時～6時　柿ノ木台他，

到達時間流出率ははじめ0.1程度である．浸透した雨水が土中水を増加させてそのため表面流出が増加すると考えられるので，横軸に累加雨量，縦軸に到達時間流出率をとってみると図7のようになる．この場合は到達時間流出率は0.3～0.4へ向けて変化するが累加雨量が100mmぐらいまでのためこの先どうなるかわからない．漸増して大きな到達時間流出率になるかも知れない．累加雨量が30mm程度でも到達時間流出率が0.4ぐらいを示す例もあり，不飽和層のまゝで表面流出が行なわれているのであろう．貯留関数ではある程度流出率が大きくなれば，1と近似して，その時の累加雨量を飽和雨量と呼んでいる．

(ウ) 途中で雨がやむ場合の到達時間流出率

1977年9月19日　月崎　図8参照．

雨が降って到達時間流出率が増すが，途中で雨がやむと，これは再び小さくなる．到達時間流出率は降雨再開後急激に増す．このことは一定強度の雨が持続した場合には到達時間流出率は大きな値なのに，それは降雨の中断と共に容易に小さな値になること，従って，大河川で，流域内で所々で雨が止んでいる場合には流出率が小さく抑えられる可能性があることを示している．

4. まとめ

防災センターで観測している浦白川流出試験地の雨量，流出のデータをもとにして降雨災害防止対策に用いられる合理式の流出係数や洪水予報などに役立つ流出率の変化を調べた．期間も十分でなく，小流域なるが故の観測上の困難もあるので，これだけの資料から十分なことは言えないが，相対的に大きい流域としての月崎と小さい流域の柿ノ木台を比べて，洪水の到達時間が柿ノ木台で約30分，月崎で約80分でその差は河道の効果とみられること，流出係数は0.4前後であることがわかった．

また到達時間流出率は降雨開始以来増加し，雨が降り続くと大きくなり一定強度で継続すると0.6程度にはなること，雨が途中でやむと減るというような結果がえられた．従って流出係数も0.4よりは大きくなる可能性も考えられる．今後この種の観測を継続して，資料を充実し，洪水などの降雨災害に対する防災に役立てたいと考えている．

参考文献

1) 青木佑久 (1972) ：山地流域における洪水流出の追跡，土木研究所報告143号 pp. 27～58.

2) 土木学会 (1971) ：水理公式集　pp.121及びpp.435～436.

3) 木村俊晃 (1961及び1962) ：貯留関数法，土木技術資料　Vol. 3, No, 12; Vol. 4, No, 1;

Vol. 4, No, 4；　Vol. 4, No. 5；　Vol. 4, No. 6；　及びVol. 4, No. 7.
4）木下武雄（1967）：流出モデルの比較，土木技術資料　Vol.9，No.7.
5）木下武雄（1974）：洪水計算の考え方(I)，水利科学，　No.97，pp,53～72.
6）木下武雄・中根和郎（1977）：表面流出に関する研究（その1），セ研報18号，pp.35～49.
7）木下武雄（1980）：降雨災害対策における超過確率年の例と問題，セ研報23号，pp.1～10.
8）木下武雄（1981）：黄河の流出率．第25回水理講演会論文集，pp.171～174.
9）岸井徳雄（1978）：浦白川流出試験地の洪水流出特性，セ研報20号，pp.17～30.
10）物部長穂（1933）：水理学，岩波書店．P.350.
11）岡本雅美（1981）：山地河川流域における降雨による洪水流出現象の研究（学位論文).
12）菅原正巳・丸山文行（1956）：雨量から流量を予知する方法について．水文諸量の予知に関する研究論文集（安芸皎一編）．
13）菅原正巳（1972）：流出解析法．共立出版．

（1981年11月20日　原稿受理）