

# 自然流域と都市流域の洪水流出特性の比較

岸井 徳雄\*・青木 佑久\*

国立防災科学技術センター

## Comparison of Flood Runoff Characteristics between Natural and Urbanized Basins

By

T. Kishii and S. Aoki

*National Research Center for Disaster Prevention, Japan*

### Abstract

In an attempt to estimate the increase in total volume and peak discharge of flood runoff, when a natural basin which consists mainly of mountains, forests and wastelands becomes urbanized (industrial and residential areas, parks, etc.), the runoff ratios and runoff coefficients of the Rational Formula were compared between natural and urbanized basins in Japan. The studies were carried out by applying the rainfall and runoff data observed in 23 basins.

Both natural and urbanized basins are further divided into basins of high and low permeability, according to their surface geology. Consequently the basins are classified into four groups. The basin of high permeability is defined as that covered with quaternary volcanic rocks or pyroclastics or weathered granite rocks.

As a result of analyses concerning floods with over 100 mm in total rainfall, the average runoff ratio is about 0.6 for both the natural and urbanized basins of low permeability. For natural basins of high permeability, the average runoff ratio is 0.2 and in the urbanized ones it is 0.3. The average runoff coefficient is about 0.75 both in the natural and urbanized basins of low permeability. In the natural basins of high permeability, the average runoff coefficient is 0.2 and in the urbanized ones it is 0.3.

From these results, it is considered that, in urbanization, the surface geology is basically an important factor in the runoff characteristics as distinct to the changes in land use which are relatively important.

Besides, by analyzing the parameters of Kimura's Storage Function, it is confirmed that the storage capacity of the basin will decrease due to urbanization.

---

\* 第1研究部風水害防災研研室

Lastly, the result of analysis using Kadoya's formula makes it clear that the concentration time of flood in urbanized basin is about one-third of that in natural one.

## 1. はじめに

都市およびその近郊において開発が進行すると、今まで丘陵、林地、田畑であった地域が市街化して土地利用状況が変化し、また、河川、下水路等の排水路網が整備される。

水文学的にいえば、自然流域が都市化することにより、屋根・道路等の不浸透面積率が增大して、浸透能の低下をきたし、表面貯留と損失雨量が減少し、その結果流出総量が增大する。一方、表面粗度の減少と排水路網の増加により、流出速度の増大、すなわち洪水到達時間の短縮をもたらす、洪水ピーク流量の増大をもたらす。

このような都市化に伴う洪水流出特性の変化については、以前から数多くの研究が続けられている。

洪水流出特性に大きな影響を及ぼすもう一つの大きな要素として流域自体が本来持っている特性である地質がある。今まで地質と流出の関係について報告したものに、低水流出については虫明らによる水力開発と流域の地質についての研究（高橋編，1978）、岸井によるタンクモデルの比較研究（岸井，1977）等があり、洪水流出についても、木村は貯留関数の有効雨量の推定法のなかに、地質の影響を考慮して、飽和雨量を地質で分類している（木村，1961）。

以上のことから、本報告では、数多くの試験流域において観測された精度のよい降雨量および流出量の資料に基づいて、自然流域と都市流域という流域の土地利用の差異および流域の地質特性が洪水流出特性に及ぼすそれぞれの影響を論じた\*。検討の対象とした流域は、国立防災科学技術センターおよび建設省各地方建設局等の管理する合計23流出試験地である（表1）。洪水流出特性として、流出率、ラショナル式の流出係数、貯留関数および角屋らの提案による洪水到達時間の実用式（角屋他，1976）の係数を調査し、これらを上記分類によって比較検討した。

これらの検討成果は、とくに中小河川における水害防止の事業計画等のための基礎資料となりうる。

## 2. 流出試験地の流域特性による分類

流出試験地を土地利用の面から自然流域と都市流域に分類し、次に表層地質の面から浸透

\* 都市化に伴う洪水流出については、一つの流域が自然流域から都市流域に変化していく状態を経時的に観測し、これを解析するのが正攻法であるが、そのような長期間の調査は実務的に不可能であるので、全国の数多くの試験流域を両流域に分類し、これらのもつ洪水流出特性を統計的に処理して、両者の差異を比較検討することとした。

流域と非浸透流域に分類する。最終的に4種類の流域に分類する。

まず、土地利用調査に用いる地目としては、全国的に同一の基準で資料が得られるよう総理府統計局の分類により、山林、原野、田、畑、池・沼、宅地、都市公園、工場用地とした(総理府統計局編, 1977)。これら8種類の地目のうち、従来水文学上、山林地の流域表層土壌は多孔質で損失雨量が大きく、一方、市街地の宅地では不浸透面積率が損失雨量を支配する(山口他, 1971)とされている。そこでこの二つの特徴的な地目である山林と宅地の面積率によって各流出試験地を自然流域と都市流域に分ける。その基準は山林・原野が70%以上の流域を自然流域とし洪水ピーク流量が変化し始めるとされる宅地20%以上(角屋, 1976)の流域を都市流域とした。その際の地目調査時点は各流出試験地の洪水観測期間を代表する時点における土地利用地目調査結果を採用したものであり、調査時点は1970年から1978年の間にある。以上の分類の結果、自然流域と定義される流出試験地は、16箇所である。都市流域は7箇所計23箇所の流域を対象として選んだ。

さらに、これらの対象流域を表層地質によって浸透流域と非浸透流域に分ける。その理由としては、貯留関数法の有効雨量の推定法に見られるように第四紀火山岩地帯と非第四紀火山岩地帯とは、経験的にその飽和雨量に大きな差異が認められる(木村, 1961)こと、また、水力発電所の資料によると、その上流域の地質が第四紀火山岩である場合はその湯水流出高が2mm/日以上で最も大きく、次いで風化花崗岩地帯が1.5mm/日で大きいこと(高橋他, 1978)などの事実から、地質によって流域の洪水流出性状、すなわち、その浸透性が大きく異なると推定されるからである\*。

これらのことから本研究では、条件を単純化して浸透流域・非浸透流域の2つに分け、浸透流域は第四紀火山岩(火山噴出物を含む)や風化花崗岩で流域のほとんどが被われている流出試験地と規定し、関東ロームで被われている多摩ニュータウン、風化花崗岩地帯の裏筑波、諸木川等がこれに属する。非浸透流域は、浸透流域以外の流域とし、それには、第三紀層で被われている庄内川流出試験地、日本列島の最古の土台とされる飛騨変成岩が流域の大半を占める黒部川流出試験地等がこれに属する。当センター所管の浦臼川流域も第四紀の上総層群と呼ばれる砂質泥岩で被われ、比較的浸透性の小さい非浸透流域である。以上のように分類すると自然流域のうち、浸透流域は5箇所、非浸透流域は11箇所であり、都市流域のうち、浸透流域3箇所、非浸透流域4箇所となる。

これら、表層地質、土地利用等を流出試験地毎に整理したのが表1である。

各流出試験地の流域面積は同表中に掲げるとおりで、すべて中小河川流域であるが、それ故に、地質、土地利用等が比較的単純であるので、以下に述べる比較検討には条件が単純化でき好都合である。

\* 不浸透層の基岩上を被う土壌層が、主として洪水流出に関与するとされているが、浸透流域では、その土壌層が厚く、不浸透流域では比較的薄いと推定される。

表 1 流出試験地の概要  
Table 1 Summary of experimental basins

	流出試験地名	流域面積 (km <sup>2</sup> )	主たる表層地質	土地利用 (%)				所在 都道県名
				山林	田	宅地	その他	
自然 流域	裏筑波(山口川)	3.12	風化花崗岩	100	0	0	0	茨城
	諸木川	1.24	風化花崗岩	83	3	4	10	広島
	多摩ニュータウン (南大沢)	0.97	第四紀火山岩または火山 噴出物	69	10	2	19	東京
	多摩ニュータウン (別所)	0.93	第四紀火山岩または火山 噴出物	70	13	3	14	東京
	裏筑波(祖父ヶ峰)	0.16	風化花崗岩	100	0	0	0	茨城
自然 流域	鹿曲川	50.0	第三紀層	77	9	3	11	長野
	黒部川	18.2	古生層(飛騨変成岩)	100	0	0	0	富山
	浦白川(月崎)	8.6	第四紀層(上総層群)	94	4	1	1	千葉
	奥野井谷川	8.0	古生層	100	0	0	0	徳島
	筑川(鈎取橋)	6.37	第三紀層	82	5	12	1	宮城
	平城ニュータウン(No. 2)	2.56	第三紀層	73	16	3	8	奈良
	筑川(佐保山)	1.97	第三紀層	98	2	0	0	宮城
	平城ニュータウン(No. 3)	1.91	第三紀層	73	16	0	11	奈良
	平城ニュータウン(No. 1)	1.87	第三紀層	68	16	3	13	奈良
	平城ニュータウン(No. 3')	1.75	第三紀層	73	16	0	11	奈良
浦白川(柿ノ木台)	0.15	第四紀層(上総層群)	100	0	0	0	千葉	
都市 流域	浸透流域 石神井川(根村橋)	47.98	第四紀火山岩または火山 噴出物	0	0	82	18	東京
	石神井川(上石神井)	16.48	第四紀火山岩または火山 噴出物	0	0	81	19	東京
	多摩ニュータウン(永山)	0.028	第四紀火山岩または火山 噴出物	0	0	100	0	東京
自然 流域	非浸透流域 庄内川(横田川)	17.99	第三紀層(鮮新世)	18	7	33	42	愛知
	庄内川(山崎川)	13.48	第三紀層(鮮新世)	11	0	84	5	愛知
	平城ニュータウン(No. 5)	0.36	第三紀層	0	0	72	28	奈良
	筑川(ひより台)	0.32	第三紀層	0	0	100	0	宮城

### 3. 洪水流出率の検討

#### 3.1 流出率と流域特性および総雨量との関係

ここでは、各流出試験地の洪水資料\*から、流出率と総雨量の関係を自然流域・都市流域(流域の開発度)および浸透流域・非浸透流域(流域地質)について総括的に調べる(図1a~図5b)。図1a~図1bは、総損失雨量と総雨量の関係を示したもので、総損失雨量  $R_L$  (mm) は、総雨量  $R_T$  (mm) から総直接流出高  $Q_T$  (流域面積で除してmm単位で表わす。以下同じ)、を差し引いたものであり、総直接流出高は、洪水ハイドログラフの立ち上

\* 3章から6章までの解析に使われた雨量、流量共10分間単位の資料である。

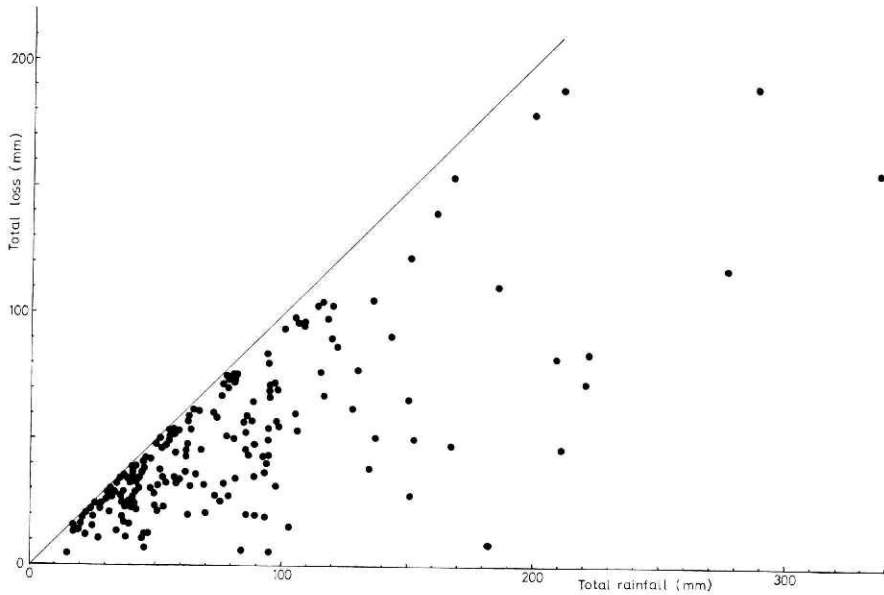


図 1a 総損失雨量と総雨量との関係, 自然流域

Fig. 1a Relation between total amount of rainfall loss and total rainfall on natural basins

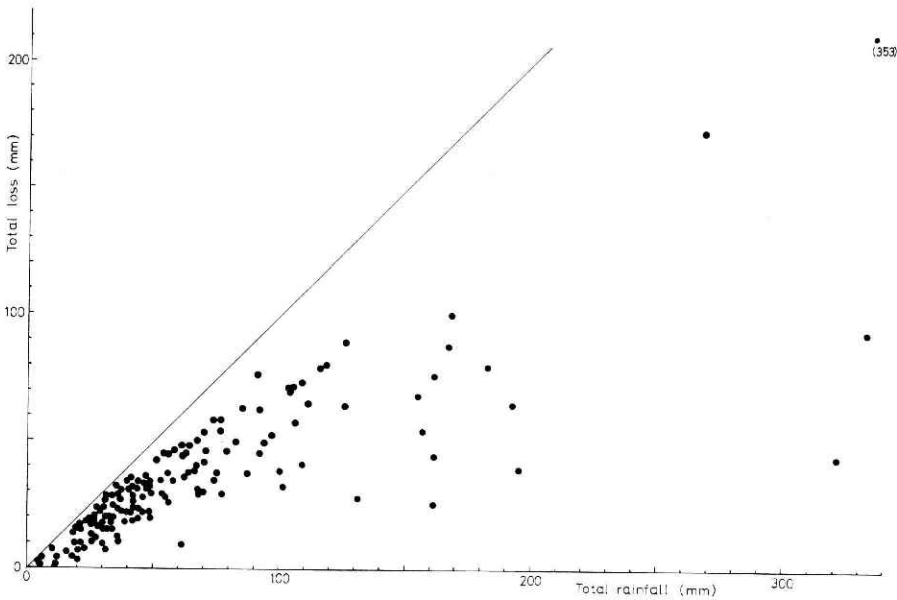


図 1b 総損失雨量と総雨量との関係, 都市流域

Fig. 1b Same as Fig. 1a except urbanized basins

がり点から、わずかに右上りの直線を引き、その直線以下の基底流出分を除いた総流出高である。図中の総雨量の軸と45度の角度をもつ直線は、総雨量と総損失雨量が等しい状態、すなわち流出率が0の状態を表わす。

図 1 aは、自然流域の16流域、総計181洪水(1961年~1977年の観測期間)を対象にし

たもので、この図において、45度の直線と図中の点は、総雨量の増加とともに、総雨量がほぼ80mmの付近で離れ始め、この値は、少なくとも流域のある部分で洪水流出が生じ始める総雨量の値である。また、総雨量が200mm以上になってもおおむね50mm～100mm以上の総損失雨量があることが判る。そして各点は、全体として、45度の直線(流出率=0)から総雨量の座標軸(流出率=1)まで広く分散し、自然流域の多様性が推定される。

図1bは、都市流域の7流域、総計160洪水(1958年～1977年の観測区間)を対象としたもので、ある総雨量での流出率の最大値は、ほぼ40mm以上で45度の直線と離れ始めており、都市流域では、総雨量40mm以上で、少なくとも流域において洪水流出が生じ始めることを表わしている。また、総雨量の増加とともに各点は全体として総雨量の座標軸に近づく、すなわち、総雨量の増加に伴って総損失雨量の増加率が減少していく傾向がみられる。さらに、自然流域に比べると点の集合は、45度の直線と総雨量の座標軸の間のある範囲、流出率で0.4～0.8の間に集中しており、都市流域では、自然流域に比し、流域毎のばらつきが少なくなり、降雨の損失機構の差が小さくなっていることが推定される。

図2a～図5bは、流出率と総雨量との関係を示したものである。ここで、流出率(runoff ratio)  $f_r$  とは、前述した、 $Q_r$ 、 $R_r$  により

$$f_r = \frac{Q_r}{R_r} \quad (1)$$

で定義したものである。ただし、実用上、洪水を対象とすることを考慮して、総雨量が50mm以上のものについてその流出率を調べたものである。その結果、対象洪水は、自然流域、132例、都市流域、71例となった。

図2aは、自然流域の全流域(浸透流域と非浸透流域を合わせたもの、以下同じ)の流出率を示す。流出率は0.03から1.0に近い値まで広く分布している。しかし浸透流域(自然流域)のみについては図2bで明らかのように、流出率は総雨量が300mm近くでも0.6以下で大半は0.3以下である。一方、図2cの非浸透流域(自然流域)のみの流出率は、下限値(ある総雨量に対するその時の流出率の最小値)が0.15で上限値(ある総雨量に対するその時の流出率の最大値)は1.0近くまで広く分布している。流出率の下限値は、浸透流域に比較し大きく、総雨量の増大とともに増加している。例えば総雨量100mmで0.3、200mm以上で0.5以上という増加を示しており、これから、総雨量200mm以上の洪水では、総損失雨量は総雨量の1/2を越えないといえる。

図3aは、都市流域の全流域の流出率と総雨量の関係である。自然流域の場合の図2aと比較し、流出率の値は、0.1から0.9までとややまとまった範囲にあり、その下限値も総雨量100mmで0.13、200mmで0.26と漸増傾向がはっきり出ている。さらに図3bの浸透流域(都市流域)のみをみると流出率は、0.13から0.55のまとまった範囲にある。また、下限値は自然流域の浸透流域のそれに比し大きく総雨量とともに漸増傾向にある。このこと

は、宅地等の不透透面積率の増大による影響が、わずかであるが出現しているためであろう。図 3 c は非浸透流域（都市流域）を対象としたものである。明らかに総雨量とともに、流出率は増加傾向を示し、その傾向は上限値より下限値に顕著に出ており、総雨量 100 mm で 0.3, 200 mm で 0.5 となっている。

図 4 a ~ 図 5 b は、代表的な流域について、個別に流出率と総雨量との関係を示したものである。これらの図から、黒部川流出試験地の例でも明らかなように自然流域の非浸透流域（図 2 c）では、都市流域（図 3 a）に比較して同程度あるいはそれ以上の流出率を生ずることがわかる。また、自然流域の浸透流域である裏筑波流出試験地の例のように総雨量が 200 mm 以上においても流出率は 0.15 以下の値をとり、その総損失雨量は 200 mm 以上と推定されるような例も見うけられる。個々の流域例を示す図中の実線は、流出率の上限値を結んだ包絡線であり、その流域である総雨量に対して起こりうる最大の流出率（ただし、観測された期間内の洪水に限る）を表わす。これを総雨量との関係でみると、裏筑波流出試験地（図 4 a）、多摩ニュータウン（永川）流出試験地（図 5 a）のような浸透流域では、総雨量 50 mm まで流出率は増加傾向がみられるが、それ以上においては、一定値近くになっていることが認められる。

一方、黒部川流出試験地（図 4 b）、庄内川（山崎川）流出試験地（図 5 b）等の非浸透流域の例では、総雨量の増加とともに包絡線は上昇カーブを描いており、流出率の増大は顕著に表われている。このことは下限値についても明らかであり、特に総雨量 100 mm 以上について著しく、この傾向は非浸透流域全体（図 2 c、図 3 c）においても認められる。すなわち、非浸透流域では、総雨量が 100 mm を超えると流出率の下限値が大きく増加している。換言すれば、総雨量が 100 mm を超えれば総損失雨量  $R_L$  が総雨量  $R_T$  に対して小さくなると言える。

なお、都市流域においては、不透透面積率が流出率と等しい値をもつという考え方（山口他, 1971）がある。これは、不透透面以外の地表面に降った雨は、すべて損失雨量となるという考えに基づいている。これを、流出率～総雨量の図面上にプロットするとその点は、総雨量の軸に平行（流出率＝不透透面積率の線上）に並ぶはずであるが、ここで論じた庄内川流出試験地のような非浸透流域では、流出率は一定でなく、総雨量とともに増加する傾向がある。

### 3. 2 流出率のまとめ

3. 1 で流出率と流域特性との関係を概括的に調べたが、本節では、図 2 a ~ 図 3 c において対象とした同一洪水を対象として、その流出率の平均値等が総雨量および流域特性によってどのような値をとるかを調べた。その結果が表 2 a ~ 表 2 b である。

ここでは、流出率を統計的に処理して 0% から 100% までの超過率として表わす。このようなまとめ方をしたのは、流出率が、図 2 a ~ 図 3 c でみられたように、自然流域・都市流

表 2a 流域特性と流出率，総雨量 50 mm 以上  
 Table 2a Runoff ratios in each type of basins in case of over 50 mm in total rainfall

流域特性 超過率	自然流域			都市流域		
	全流域	浸透流域	非浸透流域	全流域	浸透流域	非浸透流域
0%	0.00	0.61	0.99	0.86	0.54	0.87
10%	0.67	0.45	0.72	0.72	0.44	0.80
20%	0.58	0.25	0.65	0.62	0.40	0.66
30%	0.48	0.19	0.58	0.53	0.35	0.62
40%	0.41	0.14	0.50	0.46	0.33	0.55
50%	0.34	0.12	0.44	0.40	0.30	0.47
60%	0.28	0.10	0.39	0.30	0.26	0.43
70%	0.19	0.095	0.36	0.32	0.25	0.37
80%	0.11	0.075	0.32	0.26	0.21	0.32
90%	0.075	0.060	0.26	0.22	0.18	0.27
100%	0.035	0.035	0.16	0.13	0.13	0.17
平均値	0.350	0.169	0.475	0.415	0.299	0.495

表 2b 流域特性と流出率，総雨量 100 mm 以上  
 Table 2b Same as Table 2a except 100 mm in total rainfall

流域特性 超過率	自然流域			都市流域		
	全流域	浸透流域	非浸透流域	全流域	浸透流域	非浸透流域
0%	0.95	0.61	0.95	0.86	0.41	0.86
20%	0.62	0.36	0.72	0.68	0.40	0.73
80%	0.12	0.10	0.41	0.33	0.30	0.41
100%	0.06	0.06	0.35	0.13	0.13	0.31
平均値	0.360	0.207	0.589	0.520	0.315	0.606

$$\left( \text{ここで } \int_0^b f(x) dx = 1 \right)$$

$b$ : 流出率のとき  $b=1$ , 流出係数のとき最大値

で与えられる。ここで  $P$  を百分率で表わし，各分類流域ごとに， $P$  に対応する流出率  $a$  の値を一覧表にしたのが表 2 a, 表 2 b であるとも言える。また，同表の最下段の平均値とは，各対象流域（自然流域および都市流域の全流域・浸透流域・非浸透流域）の全対象洪水の流出率の平均値である。

これら 2 表の流出率のうち 20% 値，平均値，80% 値を取り出し，各分類流域の流出率の差異を比較，図示したのが，図 6 a～図 7 b である。そのうち，図 6 a～図 6 c は，自然流域と都市流域の比較であり，一方，図 7 a～図 7 b は，浸透流域と非浸透流域の比較であ

域，浸透流域・非浸透流域ごとに，総雨量によって一定の傾向を示してはいるものの少なからず，ばらついている。そこでこれを今後の便宜をも考慮し，超過率を用いて定量的に表現しようとしたものである。

その手法を，表 2 a の自然流域のうちの全流域を例にとって説明する。まず，図 2 a で対象となった洪水の流出率の全個数を  $N$  とする。超過率 20% の欄には，流出率の上位から  $0.2N$  番目の流出率の値を示してある。従って超過率 0% の流出率というのは，図 2 a でプロットされている流出率のうち最大値を指し，超過率 100% の流出率とは，同じくその最小値である。確率論で使われる説明に従えば，流出率  $x$  の頻度分布を作り，その分布を関数形で表したものを確率密度関数  $f(x)$  とすると流出率がある  $a$  値を超える確率  $P$  (ここで言う超過率) は

$$P = \int_a^b f(x) dx \quad (2)$$



る。

図 6 a は、浸透流域と非浸透流域を区別せずに両流域合わせて、自然流域（図中記号、N）、都市流域（同、U）の流出率を、総雨量（同、R）が 50mm 以上の洪水について示したのが、左側の図であり、総雨量 100mm 以上の洪水のみを対象として流出率を求めたのが右側の図である。図中●印は超過率 20% での流出率の値、○印は同じく 80% での値、△印は平均値である。以下の図 6 a～図 7 b の記号は共通である。

この図から、総雨量 50 mm 以上の洪水に対しては、自然流域では流出率の平均値は 0.35 で、都市流域では 0.42 であり、総雨量 100 mm 以上の洪水に対しては、同じく、自然流域では 0.36、都市流域では 0.52 というれの場合も都市流域の流出率が大きい。

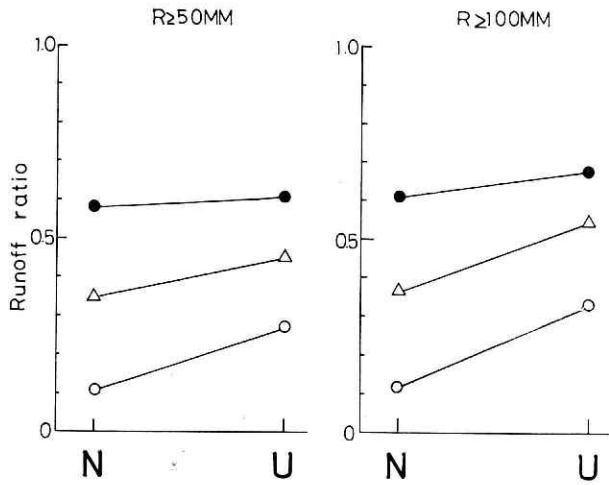


図 6a 流出率と流域の開発度との関係，全流域  
Fig. 6a Relation between runoff ratio and stage of urbanization on all basins.

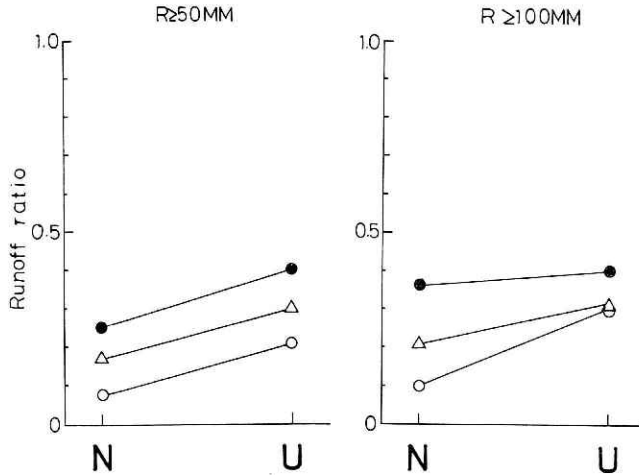


図 6b 流出率と流域の開発度との関係，浸透流域  
Fig. 6b Same as Fig. 6a except basins of high permeability

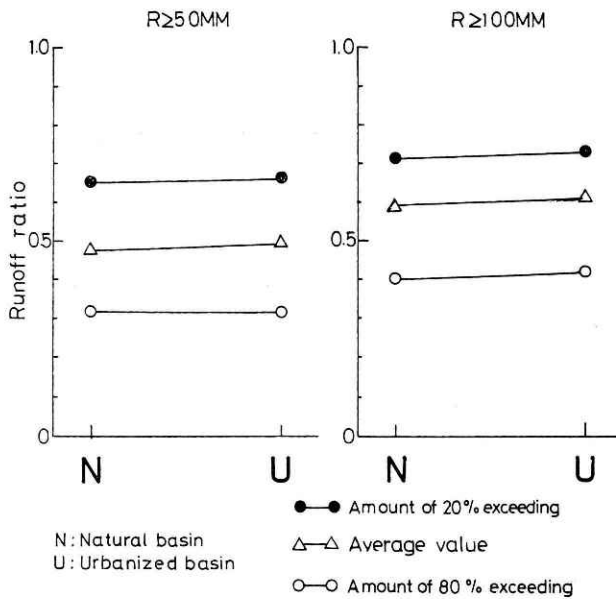


図 6c 流出率と流域の開発度との関係、非浸透流域  
 Fig. 6c Same as Fig. 6a except basins of low permeability

図 6 b は、浸透流域のみについて比較したものであり、自然流域と都市流域の流出率の差が明らかであるが、図 6 c の非浸透流域のみでの比較では、流出率の値は大きいですが、自然流域と都市流域の差はほとんどみられない。すなわち、非浸透流域が都市化すると仮定した場合、その前後の流出率には大きい変化がないと予測される。

図 7 a と図 7 b は、流域の浸透性の差異による流出率の違いを示したもので、明らかに、

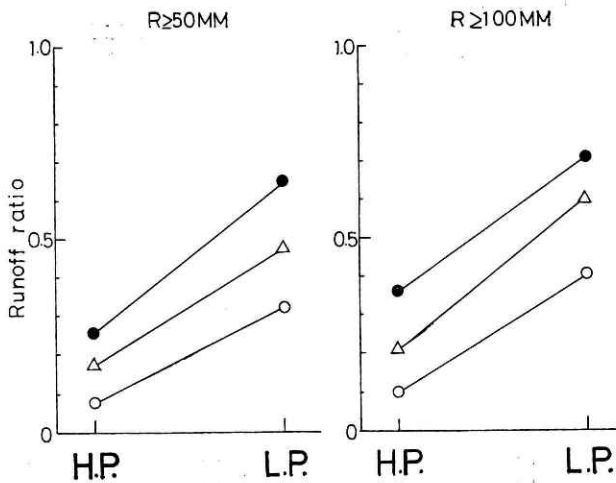


図 7a 流出率と流域の浸透性との関係、自然流域  
 Fig. 7a Relation between runoff ratio and permeability on natural basins

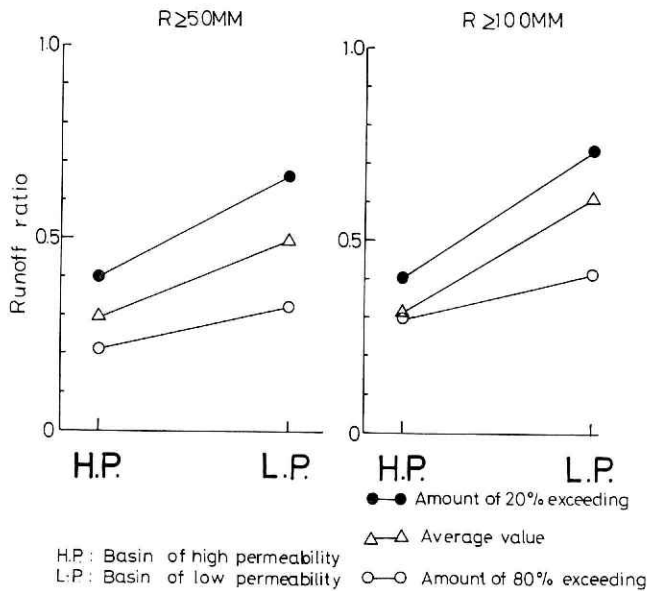


図 7b 流出率と流域の浸透性との関係, 都市流域  
 Fig. 7b Same as Fig. 7a except urbanized basins

浸透流域と非浸透流域の間に大きな差がある。さらに詳しく調べ、自然流域で総雨量 50mm 以上の洪水に対する浸透流域と非浸透流域の流出率の平均値での差は 0.31, 都市流域のそれは、0.20 で自然流域の値より小さく、浸透流域の方が都市化による影響が大きいことがわかる。また、自然流域と都市流域の流出率の平均値の差が  $0.42 - 0.35 = 0.07$  又は、 $0.52 - 0.36 = 0.16$  であることをみると、都市化に伴う洪水流出率の増加は、地質の差異による洪水流出率の差異に比べて必ずしも大きいとはいえない。

#### 4. 洪水流出係数の検討

ラショナル式は、周知のように

$$Q_p = \frac{1}{3.6} \cdot f_p \cdot r \cdot A \quad (3)$$

の形をしており、ニューヨークの下水道のピーク流量を計画する際に使われたのが始まりといわれている。

ここで、

$Q_p$ ; ピーク流量 ( $m^3/s$ ),  $f_p$ ; 流出係数,  $r$ ; 洪水到達時間内平均降雨強度 ( $mm/hr$ ),  $A$ ; 流域面積 ( $km^2$ ) である。

流出係数 (runoff coefficient) は、流域の土地利用、降雨強度、流域の河川・下水路等の排水路網、流域の勾配等によって異なる値をとるものとされ、従来は物部の提案した値 (本間他, 1966) が、一般に使われ、その資料も大河川を中心としたものとされる。

本章では、3で検討した23流出試験地の洪水、すなわち、比較的小河川の洪水を対象にし、自然流域と都市流域の流出係数を調査する。

流出係数は(4)式から求めるが、この場合の洪水到達時間内平均降雨強度を算定するための洪水到達時間は、次のようにした。各流出試験地で観測された各洪水ごとに降雨ピークとピーク流量との時間差を求め、その2倍を各洪水毎の洪水到達時間とし、その流出試験地における全洪水例の平均値を当該流出試験地の洪水到達時間とした。この洪水到達時間を用いて各流出試験地の各洪水ごとに流出係数を求めた。洪水到達時間を求める方法はほかにもいくつか提案されている。その1例として、角屋らの提案による方法については、その解析結果を6に述べる。

#### 4.1 流出係数と流域特性、総雨量および洪水到達時間内平均降雨強度との関係

図8a～図9cは全流出試験地の総雨量が50mm以上の洪水の流出係数を総雨量との関係で示したものである。図8aは自然流域の全流域を対象としたものである。流出係数は0近くから1まで広く分布しており、1.0を越える場合もあることがわかる。

図8aを浸透流域(図8b)と非浸透流域(図8c)に分けてみると特徴がはっきりする。

浸透流域(自然流域)では、流出係数の上限は0.6であり、0.2以下の洪水が多いこと、総雨量の増大と共にそれ程流出係数は増加しないことがわかる。これは前述のように、総雨量が200mm程度でも相当の浸透域が存在し、それだけピーク流量に寄与する直接流出成分が少ないことによるものであろう。

非浸透流域(自然流域)では、流出係数は総雨量と共に全体として増加しており、下限値も総雨量が100mmまでは0.2で200mm以上では、0.6以上となる。また、流出係数が1以上の値をとる洪水も生ずることがあることがわかる。

図9aは、都市流域の全流域を対象としたもので、自然流域(図8a)に比べ、平均的に流出係数が大きいこと、総雨量の増加とともに増大する傾向があること等が明らかである。

図9bは、浸透流域(都市流域)を対象としたものであるが、自然流域(図8b)に比べ、流出係数の平均値、下限値が大きいことおよび総雨量の増大と共に下限値がやや増加している傾向が認められる。

図9cは、自然流域の非浸透流域について前述した傾向と非常に似ている。

そして、総雨量の増大と共に流出係数が増加する(図8c、図9c)ことは、表層が飽和状態に近づく程、流出係数が大きくなるという傾向を表わしていると言えよう。

次に、流出係数と洪水到達時間内平均降雨強度の関係が図10aから図11cである。ただしいずれも洪水到達時間内平均降雨強度は10mm/hr以上を対象とした。

図10aは自然流域の全流域を対象としたものである。流出係数は0から1.0以上まで広く分布して、洪水到達時間内平均降雨強度(以下、降雨強度とする)との関係は、明らかでは

ない。

図10bの浸透流域（自然流域）を対象としたものでは、流出係数は0.5以下である。

図10cは非浸透流域（自然流域）を対象としたもので、全体的に流出係数は降雨強度の増加と共にやや増大している傾向がある。降雨強度が30 mm/hr以下であっても流出係数にばらつきがある。

図11a, 図11b, 図11cは、都市流域を対象としたものであるが、傾向は、前述した、図10a, 図10b, 図10cにそれぞれ相似対応している。異なる点は、流出係数の平均値は都市流域の方が自然流域より大きいことである。

図12aから図13bは、代表的な流域について個別に流出係数と降雨強度の関係を示したものである。

図12aと図12bを比べると、自然流域においても浸透流域である裏筑波流出試験地と非浸透流域である黒部川流出試験地とでは明らかな差がある。裏筑波流出試験地では、降雨強度40 mm/hr程度でも流出係数は、0.2以下であり、一方、黒部川流出試験地では、下限値が0.3で大半が0.5以上を示す。

都市流域の多摩ニュータウン（永山）流出試験地（図13a）の例では、流出係数は、降雨強度100 mm/hr程度でも0.5以下であり、一方、庄内川（山崎川）流出試験地（図13b）は下限値で0.2で、明らかに多摩ニュータウン流出試験地より平均値は大きい。

図8aから図13bまでの例で流出係数が1.0を越える洪水があった。流域の分類では、非浸透流域に属する流出試験地がほとんどであり、筑川（鈎取橋、佐保山、ひより台）流出試験地、庄内川（植田川、山崎川）流出試験地、平城ニュータウン流出試験地、黒部川流出試験地等がこれに属する。

今までに流出係数が1.0を越えた洪水例として、神流川（青木, 1972）、仁淀川（木下他, 1976）等の例が報告されており、必ずしも起り得ない現象とはいえない。前述の非浸透流域でそのような例を調べると、まず、洪水ハイドログラフの立ち上がり以前の5日間雨量が約50 mm程度以上で洪水継続時間の長い洪水の例が多く、その他、2山洪水あるいはある程度の前期5日間雨量の後に短時間強雨がある場合等であった。

#### 4. 2 流出係数のまとめ

「3. 2 流出率のまとめ」と同じ方法によって分類流域ごとに超過率に対応する流出係数平均値をまとめたのが表3a～表3cである。これらの表を図示したのが図14a～図15bである。記号はすべて3. 2で説明したものと同じである。ただし、降雨強度 $r$ が10 mm/hr以上の洪水を新たに対象に加えて3様の流出係数を検討した。この降雨強度と流出係数の関係図は、降雨強度別に分けて図示する方法も考えられるが、これまでの検討で流出係数が降雨強度の増加とそれほどよい相関が見出せなかったので、降雨強度10 mm/hr以上の一つの例に限ることとし、これらの表の20%平均値, 80%値をとりだし、各分類流域の流出係数差

表 3a 流域特性と流出係数, 総雨量 50 mm 以上  
Table 3a Runoff coefficients in each type of basins in case of over 50 mm in total rainfall

流域特性 超過率	自然流域			都市流域		
	全流域	浸透流域	非浸透流域	全流域	浸透流域	非浸透流域
0%	1.79	0.58	1.79	1.92	1.21	1.92
10%	0.93	0.35	1.00	0.94	0.72	1.11
20%	0.63	0.23	0.86	0.72	0.62	0.85
30%	0.53	0.20	0.70	0.69	0.51	0.72
40%	0.44	0.15	0.58	0.60	0.48	0.67
50%	0.35	0.11	0.52	0.55	0.38	0.63
60%	0.28	0.09	0.45	0.45	0.37	0.60
70%	0.20	0.09	0.39	0.41	0.34	0.47
80%	0.11	0.07	0.33	0.35	0.29	0.45
90%	0.08	0.06	0.28	0.29	0.24	0.35
100%	0.03	0.03	0.23	0.13	0.13	0.29
平均値	0.419	0.184	0.601	0.581	0.464	0.665

表 3b 流域特性と流出係数, 総雨量 100 mm 以上  
Table 3b Same as Table 3a except 100 mm in total rainfall

流域特性 超過率	自然流域			都市流域		
	全流域	浸透流域	非浸透流域	全流域	浸透流域	非浸透流域
0%	1.32	0.34	1.32	1.92	0.51	1.92
20%	0.80	0.32	1.00	0.85	0.51	0.95
80%	0.13	0.09	0.51	0.41	0.24	0.60
100%	0.06	0.06	0.28	0.13	0.13	0.28
平均値	0.435	0.178	0.747	0.661	0.333	0.755

表 3c 洪水到達時間内平均降雨強度 10 mm/hr 以上  
Table 3c Same as Table 3a except rainfall intensities within the time of concentration over 10 mm/hr

流域特性 超過率	自然流域			都市流域		
	全流域	浸透流域	非浸透流域	全流域	浸透流域	非浸透流域
0%	1.42	0.49	1.42	2.03	0.62	2.03
10%	0.99	0.35	0.99	0.99	0.49	1.19
20%	0.68	0.27	0.93	0.83	0.39	0.96
30%	0.56	0.21	0.88	0.69	0.37	0.80
40%	0.37	0.18	0.63	0.60	0.33	0.70
50%	0.34	0.13	0.56	0.49	0.29	0.60
60%	0.24	0.12	0.48	0.42	0.28	0.58
70%	0.20	0.10	0.38	0.37	0.25	0.46
80%	0.14	0.09	0.34	0.30	0.20	0.42
90%	0.09	0.03	0.29	0.22	0.14	0.35
100%	0.02	0.02	0.19	0.11	0.11	0.15
平均値	0.398	0.167	0.600	0.577	0.366	0.706

異を比較図示したのが図14 a ~ 図15 b である。

図14 a は, 全流域を対象にしたものであり, 自然流域と都市流域では流出係数は明らかに差が見られ, 総雨量 100 mm 以上では, 平均値において 0.23 の差がある。

さらに図14 b の浸透流域を対象にすると流出係数の平均値は都市流域においても 0.5 以下にとどまる。しかし, 自然流域と都市流域の差は, 総雨量 50 mm 以上の場合で 0.28 と明らかである。

図14 c は非浸透流域を対象とした流出係数であり, 自然流域と都市流域では, 降雨強度 10 mm/hr 以上の場合でも流出係数の差は 0.1 と大きな差がみられない。また, 図14 b と比較すると, 20% 値と 80% 値の差は, 非浸透流域で 0.3 以上で大きく, 洪水によって流出率が大きく変動するが, 浸透流域ではその差が 0.3 以下と変動幅が小さい。

図15 a と図15 b は浸透流域と非浸透流域の比較を行なったもので, 図14 a ~ 図14 c と比べれば明らかなように, 自然流域と都市流域という開発度(土地利用等)の差よりも, 流域の浸透性(地質)が流出係数に非常に顕著な差異をもたらすことがわかる。

図15 a と図15 b を比較すると, 都市流域の方が自然流域より直線の勾配が小さい。このことは, 都市流域は自然流域に比べれば浸透性(地質)の影響

が少ないといえ、浸透流域といえども都市化により不浸透面積が増え、わずかであるが非浸透流域に似てくるためであろう。都市流域における流出係数が、明らかに自然流域における流出係数よりも大きいことが確かめられた。さらに、後述するように、都市流域の方が洪水到達時間が自然流域よりも短いことを加味すれば、同一の降雨があった場合でも都市流域におけるピーク流出高は自然流域に比べて、流出係数の増加以上に増加すると言える。

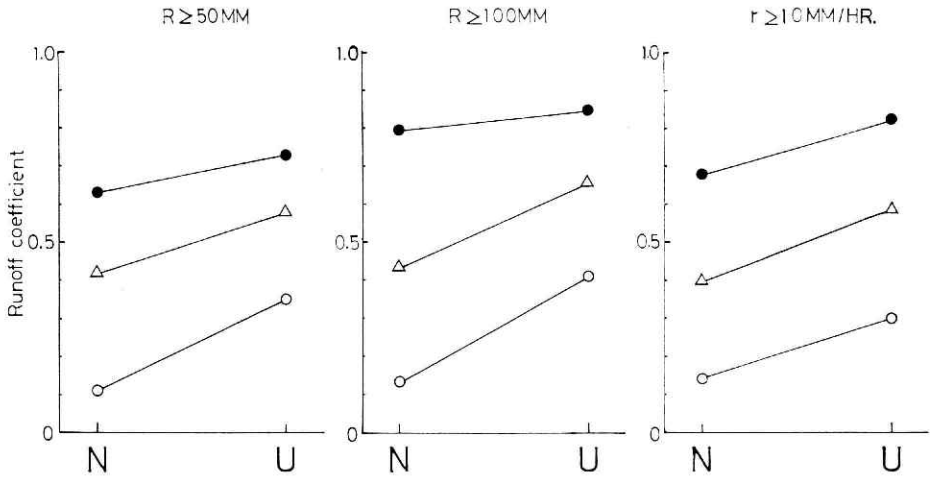


図 14a 流出係数と流域の開発度との関係, 全流域  
 Fig. 14a Relation between runoff coefficient and stage of urbanization on all basins

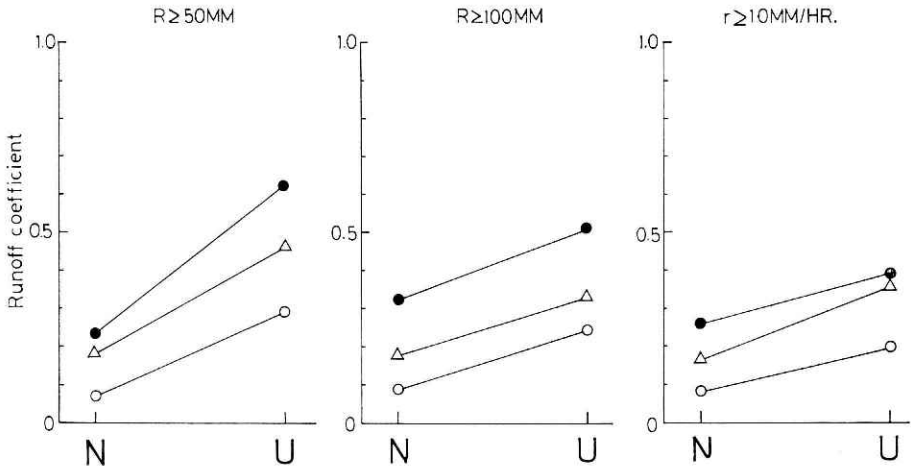


図 14b 流出係数と流域の開発度との関係, 浸透流域  
 Fig. 14b Same as Fig. 14a except basins of high permeability

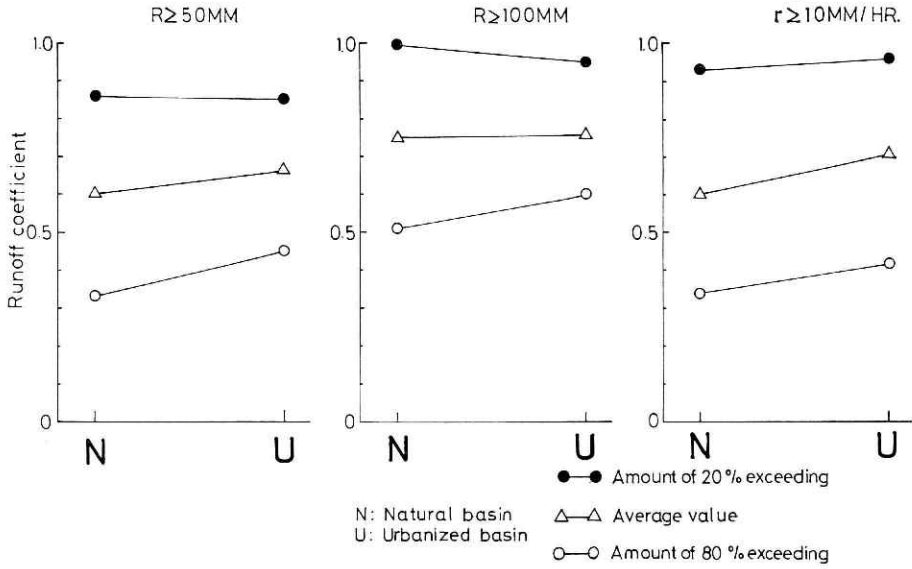


図 14c 流出係数と流域の開発度との関係、非浸透流域  
 Fig. 14c Same as Fig. 14a except basins of low permeability

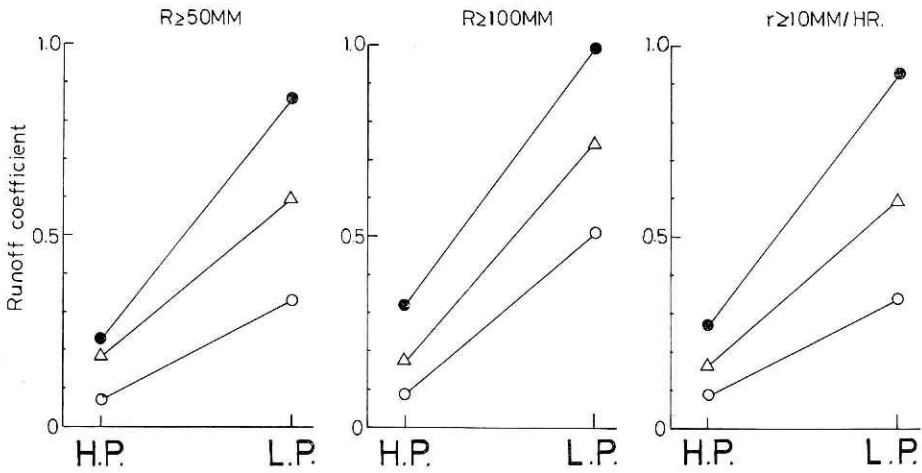


図 15a 流出係数と流域の浸透性との関係、自然流域  
 Fig. 15a Relation between runoff coefficient and permeability on all natural basins



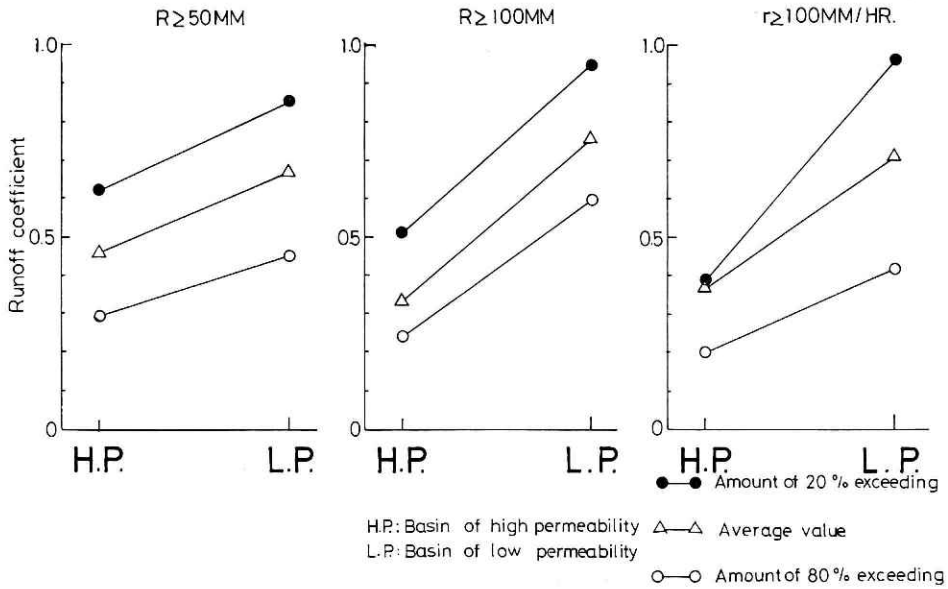


図 15b 流出係数と流域の浸透性との関係，都市流域  
 Fig. 15b Same as Fig. 15a except all urbanized basins

### 5. 貯留関数の定数 $K$ , $p$ の比較検討

流出モデルの係数が都市化とともに如何に変化するかを調べることは研究ばかりでなく，河川計画上でも重要な問題である。

この章では，すでに多用されている貯留関数の定数  $K$  および  $p$  についてこれが自然流域と都市流域とではどの程度の差があるかを調べる。

貯留関数は流域貯留高と流出高との関係を

$$S_i = K Q_i^p$$

$S_i$  は貯留高 (mm)， $Q_i$  は直接流出高 (mm/hr)， $K$ ,  $p$  は定数。

で表わす。

自然流域 8 流出試験地，都市流域 6 流出試験地を対象に，それぞれの流出試験地で観測された洪水のうち，ピーク流量が最大，総雨量が最大および洪水継続時間が最大であった 3 種類の洪水を選び (当然 3 種類の洪水が全部または 2 つが同一の洪水となる場合もある)，通常の手法により，貯留関数の式を求めた。

これからの洪水に対する貯留高  $S_i$  ~ 流出高  $Q_i$  の関係式を表 4 a および表 4 b に示す (同表中においては  $S_i$  を  $S$  と， $Q_i$  を  $Q$  と表示してある)。次にこの貯留関数式を図示したのが図 16 a と図 16 b である (図中の実線)。

図 16 a と図 16 b を比較すると自然流域の貯留高  $S_i$  ~ 流出高  $Q_i$  の直線群は，都市流域より

表 4a 貯留関数式, 自然流域  
Table 4a Equations of Storage Function on natural basins

図中の 番号	流出試験地名	S~Q 関係式	S~Q 関係式を作成した洪水の区別 ピーク流量 (Q), 最大総雨量最大(R), 洪水継続時間最大(T)
①	奥野井谷川	$S = 40.0Q^{0.35}$	Q, R, T
②-1	鹿曲川	$S = 35.9Q^{0.41}$	T
②-2	"	$S = 21.9Q^{0.36}$	Q, R
③	平城 N. T. (No. 1)	$S = 19.0Q^{1.07}$	T
④-1	諸木川	$S = 15.1Q^{0.64}$	T
④-2	"	$S = 12.7Q^{0.67}$	R
④-3	"	$S = 7.4Q^{0.38}$	Q
⑤	多摩 N. T. (別所)	$S = 7.0Q^{0.63}$	Q, R, T
⑥	黒部川	$S = 29.9Q^{0.38}$	Q
⑦	笹川 (佐保山)	$S = 7.0Q^{0.66}$	Q, R
⑧	笹川 (鉤取橋)	$S = 10.0Q^{0.38}$	Q, R, T

表 4b 貯留関数式, 都市流域  
Table 4b Same as Table 4a except urbanized basins

図中の 番号	流出試験地名	S~Q 関係式	S~Q 関係式を作成した洪水例の区別 ピーク流量 最大(Q), 総雨量最大(R), 洪水継続時間最大(T)
①-1	庄内川 (山崎川)	$S = 7.75Q^{0.53}$	Q
①-2	"	$S = 1.19Q^{0.65}$	R, T
②-1	庄内川 (植田川)	$S = 4.32Q^{0.48}$	Q
②-2	"	$S = 3.10Q^{0.80}$	R, T
③	平城 N. T. (No. 5)	$S = 1.45Q^{0.74}$	T
④-1	多摩 N. T. (永山)	$S = 0.6Q^{0.54}$	R
④-2	"	$S = 0.37Q^{0.73}$	T
④-3	"	$S = 0.17Q^{0.73}$	Q
⑤	石神井川 (上石神井)	$S = 12.0Q^{0.47}$	T
⑥-1	笹川 (ひより台)	$S = 0.3Q^{0.71}$	Q
⑥-2	"	$S = 1.2Q^{0.55}$	R, T

おおむね上方にある。すなわち、同一流出高を生ずる貯留高は、自然流域の方があきらかに大きい。自然流域の  $K$  は、都市流域のそれに比べてあきらかに大きくなる傾向を示している。一方、指数  $p$  について検討してみると、自然流域についてはその算術平均値が  $p = 0.54$  となり、都市流域については同じく  $p = 0.63$  となって大きな差はなく、計 22 の貯留関数式については、平均値が  $p = 0.6$  となる。そこで、全貯留関数式について、 $p = 0.6$  と固定し、両流域の  $K$  の差異を検討することとする。そのため、表 4 a, 表 4 b の貯留関数式を次の手法により修正する。まず各関数式ごとに流量の大きい所を重視することとし、図 16 a, 図 16 b (両対数グラフ) においてそれぞれの関数式ごとにそのピーク値の点から勾配が 0.6 の線を引く (図中の点線)。その直線と流出高 1 (mm/hr) との交点を求め、その縦座標を  $K$  の値とする。そしてその  $K$  の平均値 (算術平均) を各分類流域について求めると、自然流域

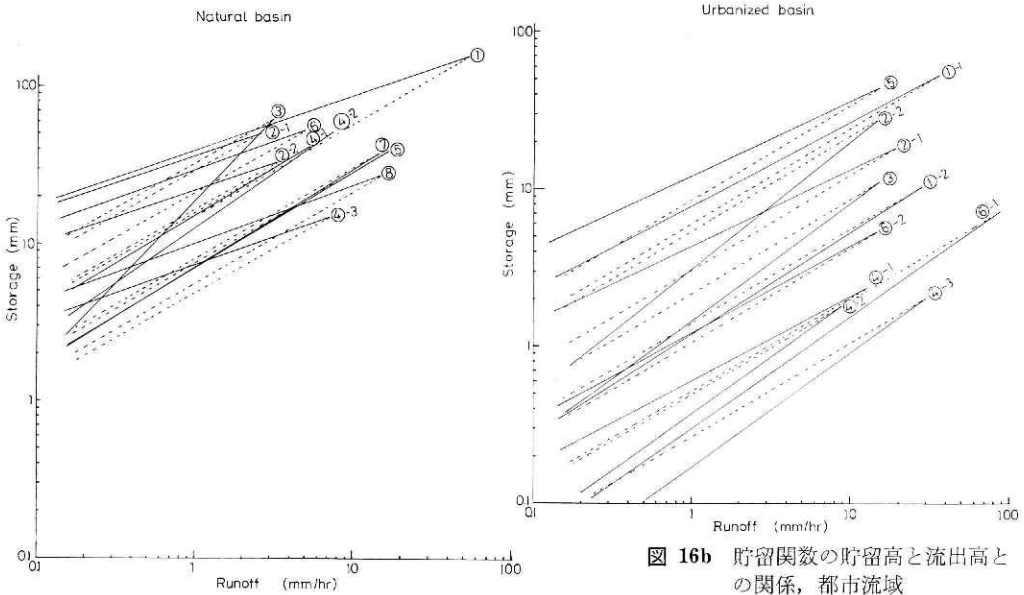


図 16a 貯留関数の貯留高と流出高との関係, 自然流域  
 Fig. 16a Relation between storage and runoff depth in the equation of Storage Function on natural basins

図 16b 貯留関数の貯留高と流出高との関係, 都市流域  
 Fig. 16b Same as Fig. 16a except urbanized basins

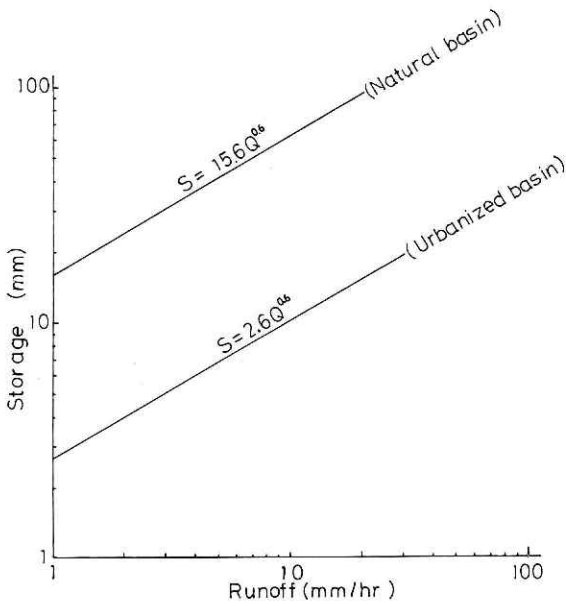


図 17 自然流域と都市流域の貯留関数の比較  
 Fig. 17 Comparison of the equation of Storage Function between natural basins and urbanized basins

では 15.6, 都市流域では 2.6 を得る (図17)。

以上の結果, 貯留関数は,

自然流域では

$$S_t = 15.6 Q_t^{0.6} \quad (4)$$

都市流域では

$$S_t = 2.6 Q_t^{0.6} \quad (5)$$

となる。

自然流域は都市流域に比べ同一の流出高に対し, 平均で 6 倍の貯留高を持っていることがわかる。

## 6. 洪水到達時間の推定式 (角屋式) の係数

ラショナル式を使って洪水のピーク流量を推定する場合必要になってくるのが, 流出係数の値と同時に洪水到達時間である。

表5 角屋式のCの値一覧  
Table 5 "C" of Kadoya's formula for time of concentration

試験地名		流域面積 (km <sup>2</sup> )	Cの値	試験地名		流域面積 (km <sup>2</sup> )	Cの値
自然流域	黒部川	18.2	140	自然流域	平城 N. T. (No. 3')	1.75	180
	奥野井谷川	8.0	130		裏筑波 (祖父ヶ峰)	0.158	200
	裏筑波 (山口川)	3.12	180		浦白川 (月崎)	8.6	110
	筑川 (佐保山)	1.97	260		浦白川 (柿ノ木台)	0.15	200
	諸木川	1.24	100		都市流域	庄内川 (植田川)	17.993
	筑川 (鉤取橋)	6.37	360	平城 N. T. (No. 5)		0.362	50
	鹿曲川	50	300	石神井川 (上石神井)		16.48	80
	平城 N. T. (No. 3)	1.91	180	石神井川 (根村橋)		47.98	80
	多摩 N. T. (別所)	0.925	130	庄内川 (山崎川)		13.484	70
	都市流域	" (南大沢)	0.968	110	多摩 N. T. (永山)	0.028	40
平城 N. T. (No. 1)		1.874	180	筑川 (ひより台)	0.32	50	
" (No. 2)		2.56	180				

そこで角屋らは洪水到達時間の推定式として

$$t_p = C \cdot r_e^{-0.35} \cdot A^{0.22} \quad (6)$$

なる式を提案している。

ここで  $t_p$  : 洪水到達時間 (min.),  $C$  : 流域の土地利用状態等で決まる定数,  $r_e$  : 有効降雨強度 (mm/hr),  $A$  : 流域面積 (km<sup>2</sup>)

この式について自然流域と都市流域のそれぞれにおける定数  $C$  を求めることとする。

前述の各流出試験地について (6) 式の  $C$  の値を求めたのが表5である。自然流域では,  $C$  の値は 100~360 で平均値は 184 であり, 都市流域では同じく 40~80 で平均値は 64 である。これをまとめれば, 洪水到達時間は

自然流域では

$$t_p = 180 \cdot r_e^{-0.35} \cdot A^{0.22} \quad (7)$$

都市流域では

$$t_p = 60 \cdot r_e^{-0.35} \cdot A^{0.22} \quad (8)$$

を得る。

(7), (8) 式で明らかのように, 洪水到達時間は, 都市流域では, 自然流域の 1/3 となる。なお, 角屋らは, 小畑川流域等の解析 (角屋他, 1976) によって, 洪水到達時間が都市流域では自然流域の 1/4~1/5 となるという調査成果を報告している。

## 7. まとめ

自然流域と都市流域の洪水流出特性の差異を検討することを主眼として, 流出率, 流出係数などに焦点を当てて調査検討した。

この結果, 流出率, 流出係数は, 都市流域での値は自然流域のそれに比べ大きくなること

表 6 流出率と流出係数のまとめ (総雨量100mm以上)

Table 6 Summary of runoff ratio and runoff coefficient (over 100 mm in total rainfall)

流域特性	自然流域			都市流域		
	全流域	浸透流域	非浸透流域	全流域	浸透流域	非浸透流域
流出率	0.360	0.207	0.589	0.520	0.315	0.606
流出係数	0.435	0.178	0.747	0.661	0.333	0.755

が確かめられた。と同時に流域を構成する表層の地質の差が流域の土地利用等の差よりもより流出率、流出係数に大きく影響していることが明らかとなった。

総雨量 100mm 以上の洪水について、流出率、流出係数の平均値を表 6 に示す。

この表のように、第三紀層や古生層の表層地質で被われた非浸透流域では、流出率、流出係数は大きい自然流域と都市流域での値に著しい差はない。また、第四紀火山岩や風化花崗岩で被われた浸透流域では、流出率、流出係数は自然流域、都市流域ともに小さい値にとどまる。

このことは、都市流域においても、流出率、流出係数が、流域の本来持っている地質特性によって大きく影響を受けるということであり、土地利用の変化等人工的な改変はこれに次ぐ影響をもたらすことを意味している。

本稿において検討した洪水の流出率、流出係数、貯留関数の定数、角屋式の定数は、全国 23 流出試験地において 1958 年から 1978 年までの間において観測された降雨量、流量資料をもとにして比較検討したものである。したがって流域面積の大きな流域は対象外であり、また流域によってはまだ大洪水の記録を経していない流域もある。本稿に述べた調査成果は、必要に応じて流域面積の大きな流域における資料を含め、また今後得られる洪水時の記録を加えて、数値およびその傾向の精度を高めていくことが必要であると思われる。

## 謝 辞

本研究は、筆者らが建設省河川局治水課および同省土木研究所水文研究室が主宰する全国流出試験地調査に共同研究として参加して得た調査成果の一部である。有意義な助言を頂いた同研究所石崎勝義水文研究室長および資料の収集に御協力下さった同所、長谷川正技官、ならびに適切な助言をいただいた木下武雄第 1 研究部長に厚く謝意を表する次第である。

## 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. 建設省土木研究報告, 第 143 号, 7.
- 2) 本間 仁・安芸岐一編 (1966) : 物部水理学, 岩波書店, 585.
- 3) 角屋 睦・福島 晟 (1976) : 中小河川の洪水到達時間. 京都大学防災研究所年報, 第 19 号 B, 143—152.
- 4) 角屋 睦 (1976) : 都市化と流出, 全国流出試験地調査打合わせ会議 (建設省) 講演資料, 18.
- 5) 木村俊晃 (1961) : 貯留関数による洪水流出追跡法ほか, 建設省土木研究所.

- 6) 木下武雄・中根和郎・福井隆文 (1976) : 1975年8月17日台風第5号による高知県東部の災害現地調査報告. 国立防災科学技術センター主要災害調査, 第9号, 30.
- 7) 岸井徳雄 (1976) : 九州地方の火山灰地帯・非火山灰地帯における諸河川の流出特性, 国立防災科学技術センター研究報告, No. 17, 1—16.
- 8) 総理府統計局編 (1977) : 日本の統計 1977. 総理府統計局, 4—5.
- 9) 高橋裕編 (1978) : 河川水文学. 共立出版, 179.
- 10) 山口高志・松原重昭・山守 隆 (1971) : 都市流出調査—降雨損失機構の検討—. 土木技術資料, Vol. 13—10, 14.

(1978年12月21日 原稿受理)

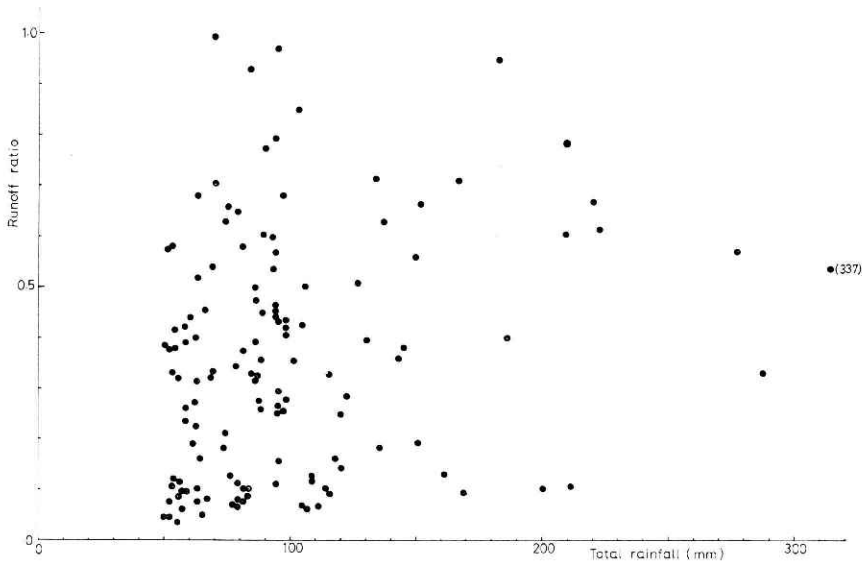


図 2a 自然流域の流出率と総雨量との関係, 全流域  
Fig. 2a Relation between runoff ratio and total rainfall on all natural basins

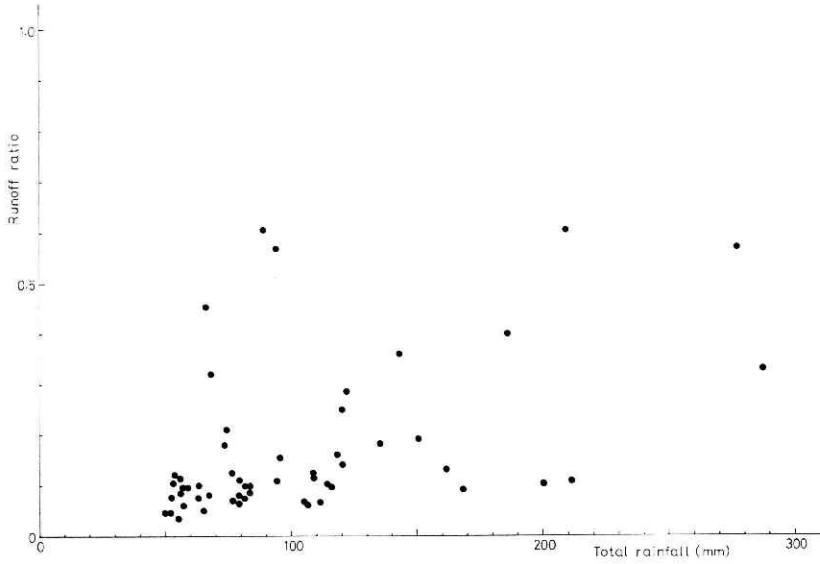


図 2b 自然流域の流出率と総雨量との関係, 浸透流域  
Fig. 2b Same as Fig. 2a except basins of high permeability

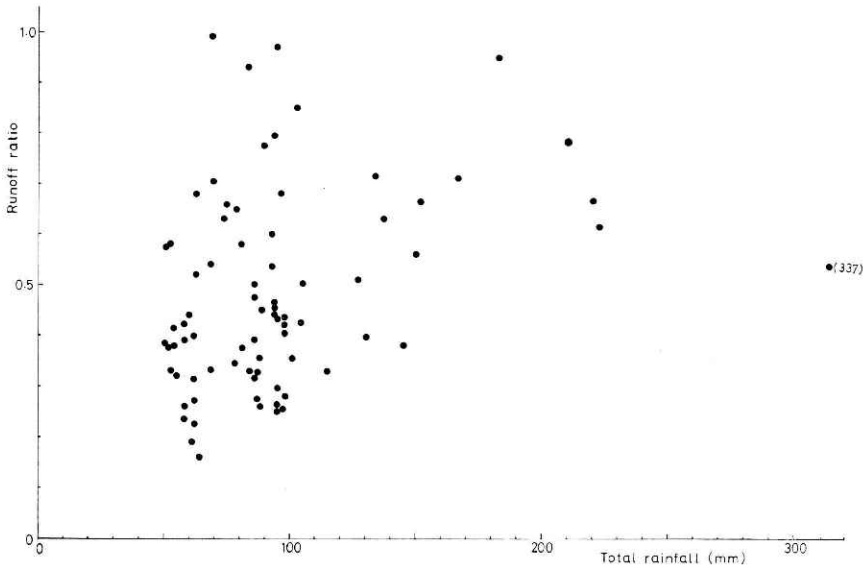


図 2c 自然流域の流出率と総雨量との関係, 非浸透流域  
Fig. 2c Same as Fig. 2a except basins of low permeability

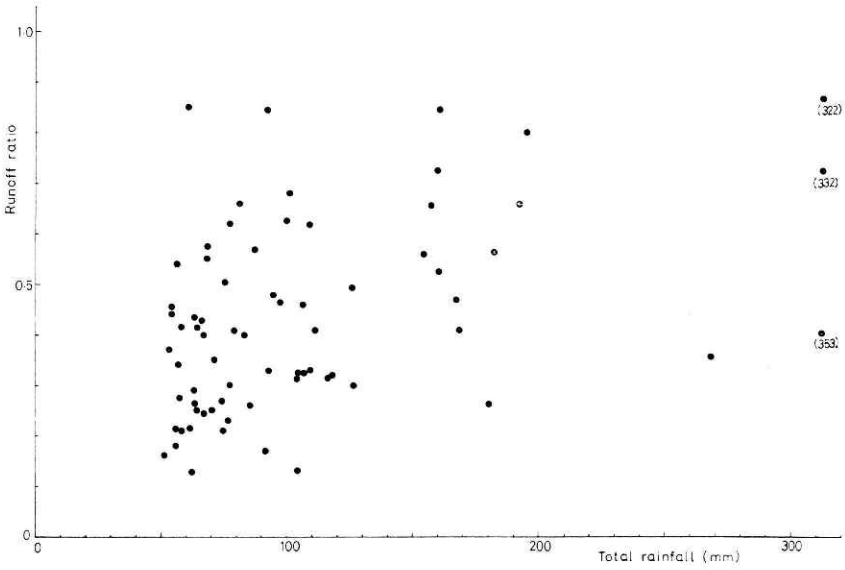


図 3a 都市流域の流出率と総雨量との関係, 全流域  
Fig. 3a Relation between runoff ratio and total rainfall on all urbanized basins



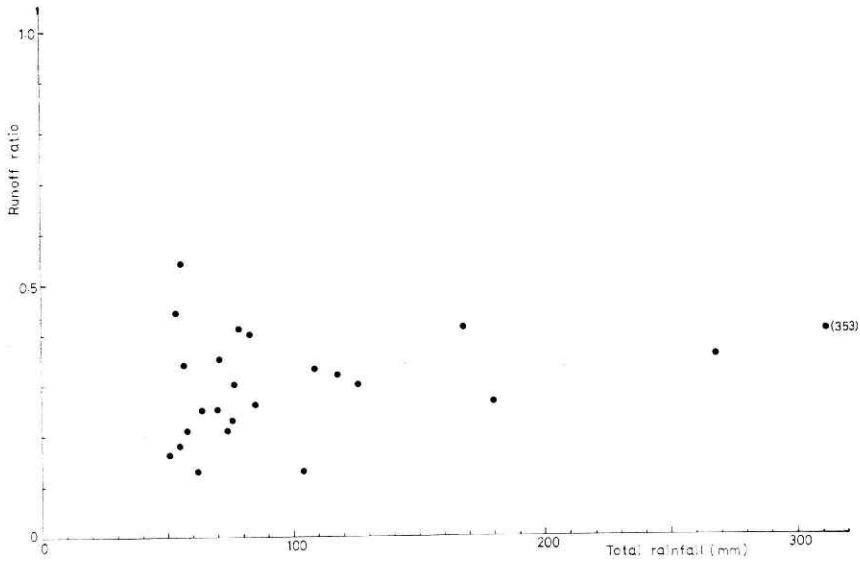


図 3b 都市流域の流出率と総雨量との関係, 浸透流域  
 Fig. 3b Same as Fig. 3a except basins of high permeability

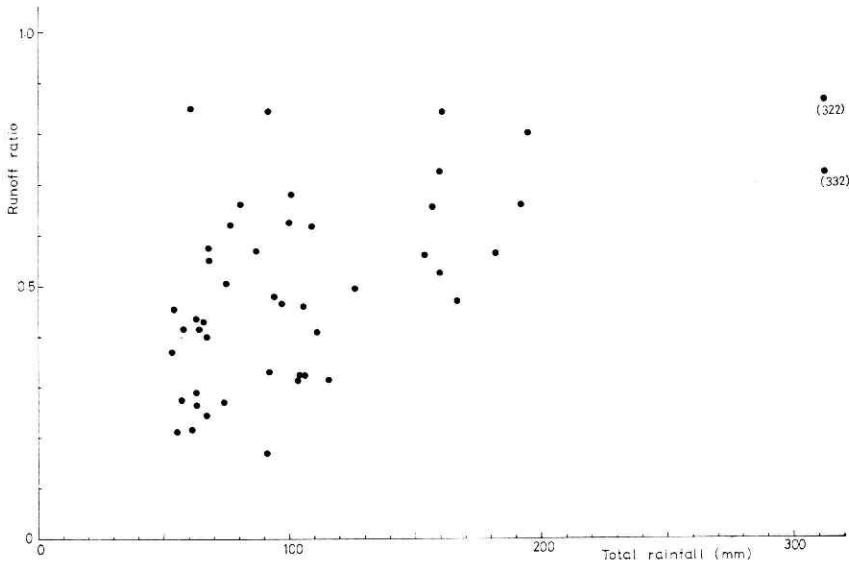


図 3c 都市流域の流出率と総雨量との関係, 非浸透流域  
 Fig. 3c Same as Fig. 3a except basins of low permeability

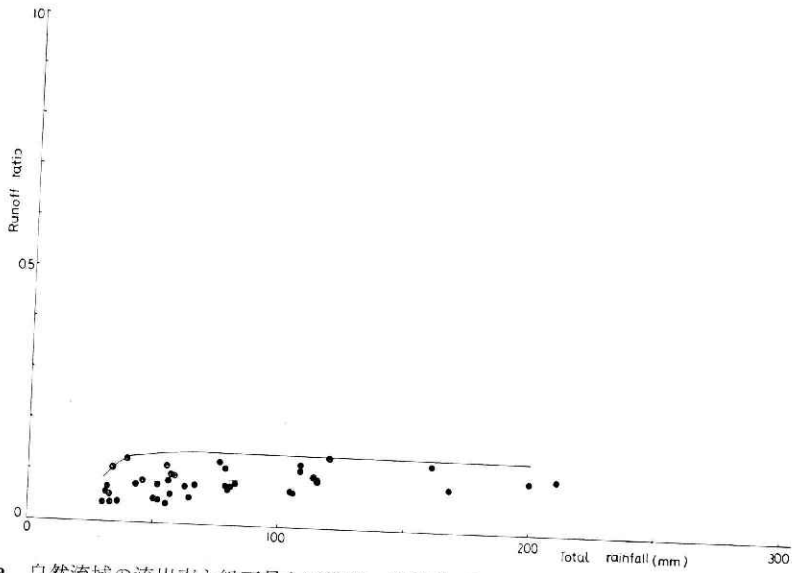


図 4a 自然流域の流出率と総雨量との関係 裏筑波（山口川および祖父ヶ峰）流出試験地  
 Fig. 4a Relation between runoff ratio and total rainfall on natural basin at Uratsukuba Experimental basin (Yamaguchi River and Sofugamine)

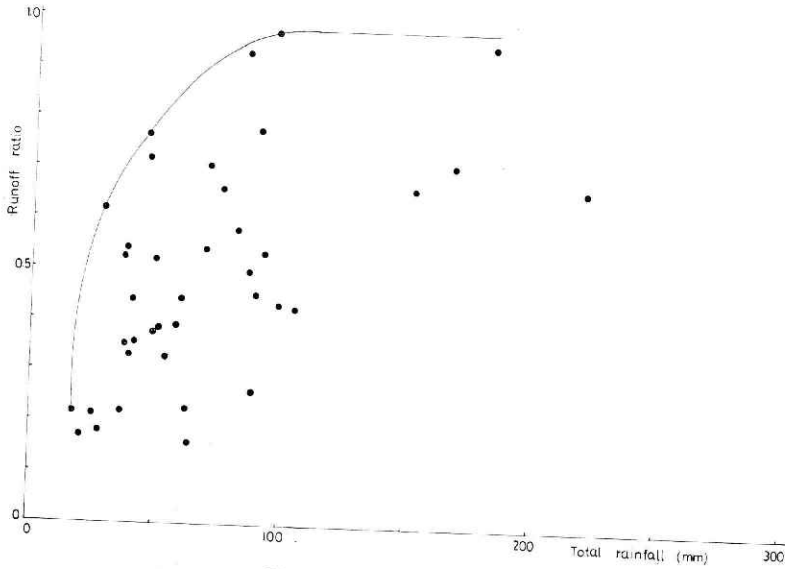


図 4b 黒部川流出試験地  
 Fig. 4b Same as Fig. 4a except Kurobe River Experimental Basin

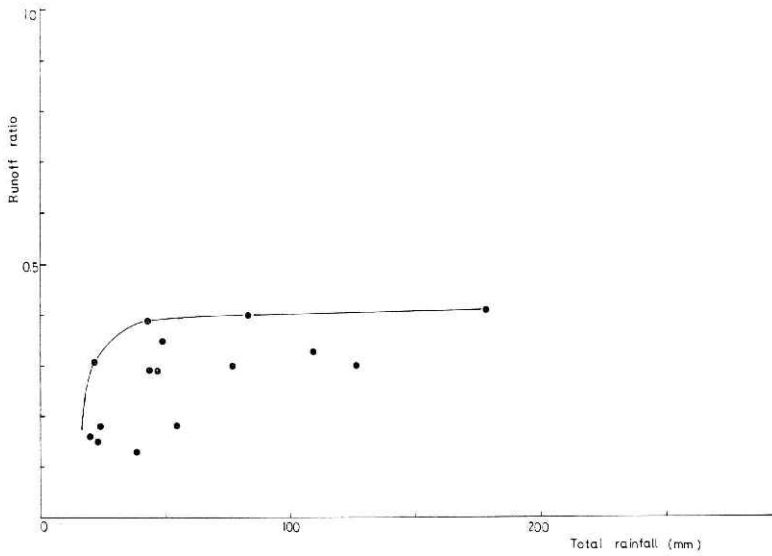
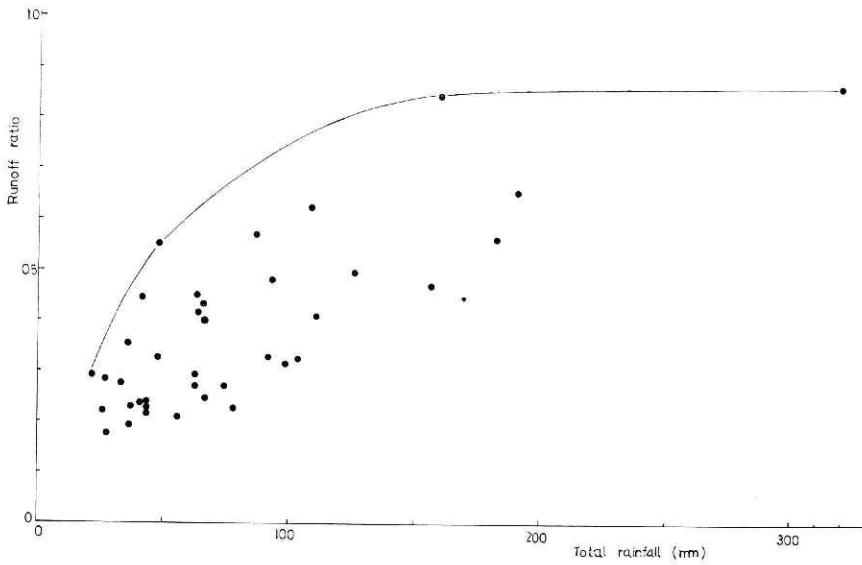


図 5a 都市流域の流出率と総雨量との関係, 多摩ニュータウン (永山) 流出試験地  
Fig. 5a Relation between runoff ratio and total rainfall on urbanized basin at Tama New Town Experimental Basin (Nagayama)



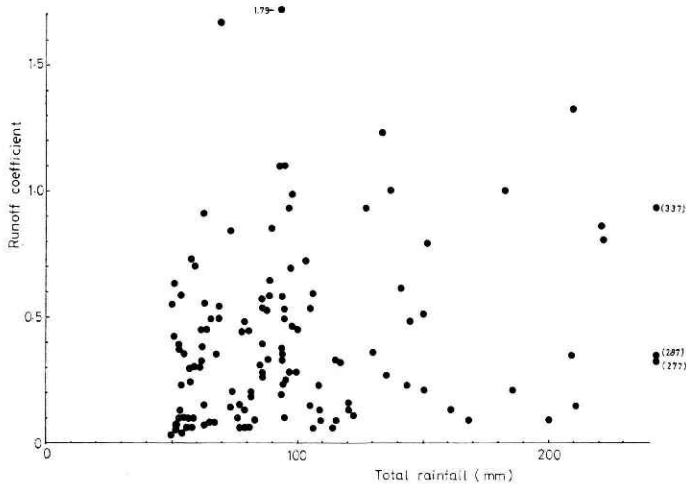


図 8a 自然流域の流出係数と総雨量との関係, 全流域  
Fig. 8a Relation between runoff coefficient and total rainfall on all basins

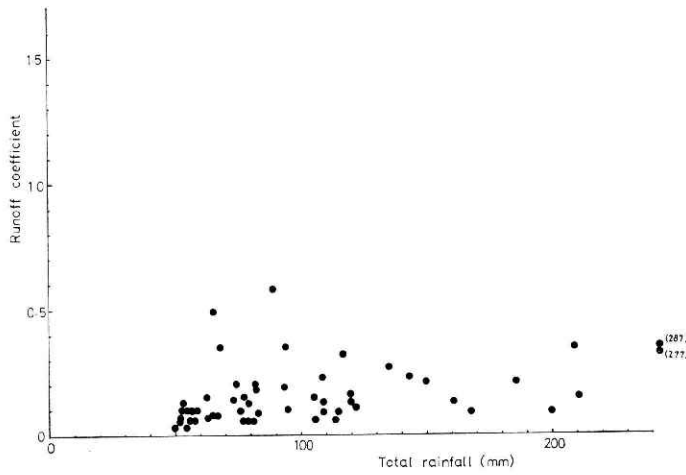


図 8b 自然流域の流出係数と総雨量との関係, 浸透流域  
Fig. 8b Same as Fig. 8a except basins of high permeability

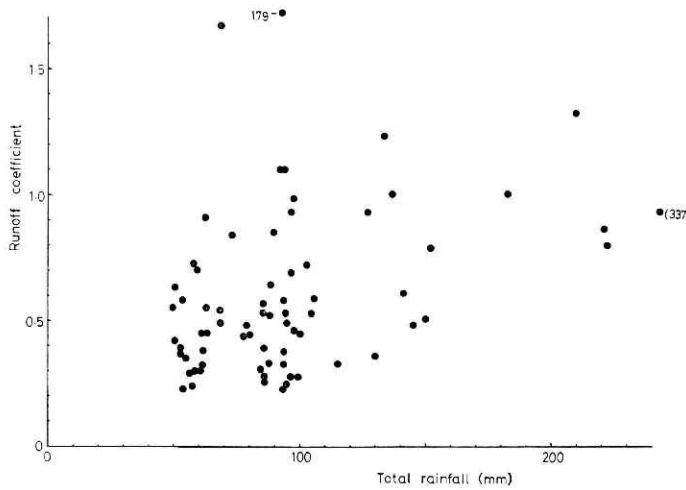


図 8c 自然流域の流出係数と総雨量との関係, 非浸透流域  
Fig. 8c Same as Fig. 8a except basins of low permeability

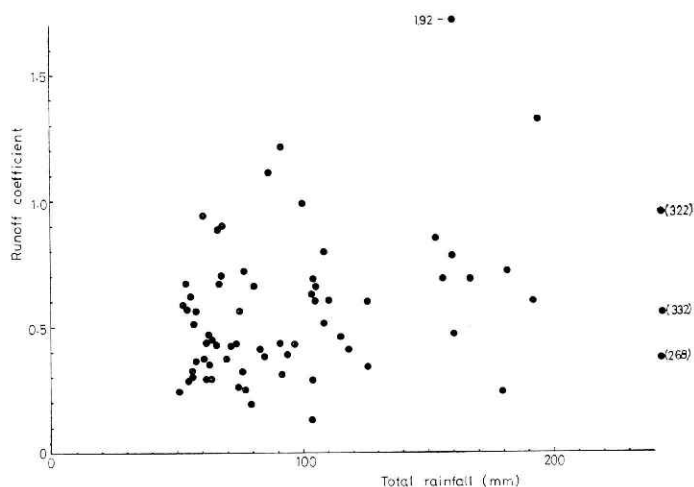


図 9a 都市流域の流出係数と総雨量との関係，全流域  
 Fig. 9a Relation between runoff coefficient and total rainfall on all urbanized basins

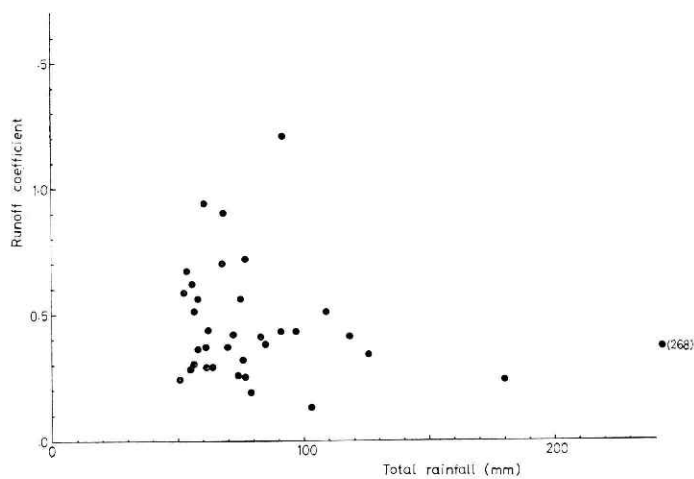


図 9b 都市流域の流出係数と総雨量との関係，浸透流域  
 Fig. 9b Same as Fig. 9a except basins of high permeability

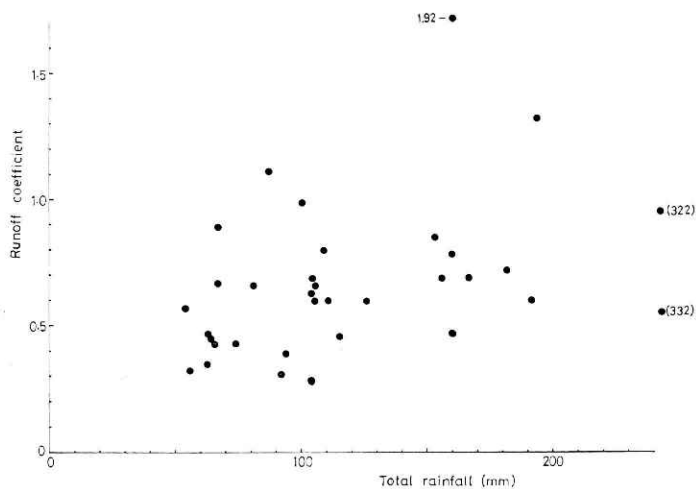


図 9c 都市流域の流出係数と総雨量との関係，非浸透流域  
 Fig. 9c Same as Fig. 9a except basins of low permeability

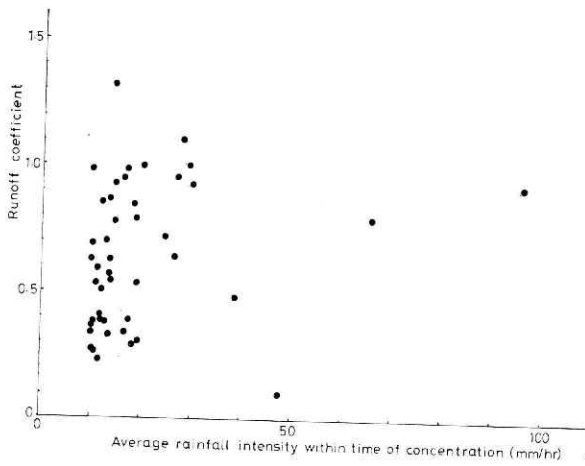


図 10a 自然流域の流出係数と洪水到達時間内平均降雨強度との関係, 全流域  
Fig. 10a Relation between runoff coefficient and rainfall intensity within the time of concentration on all natural basins

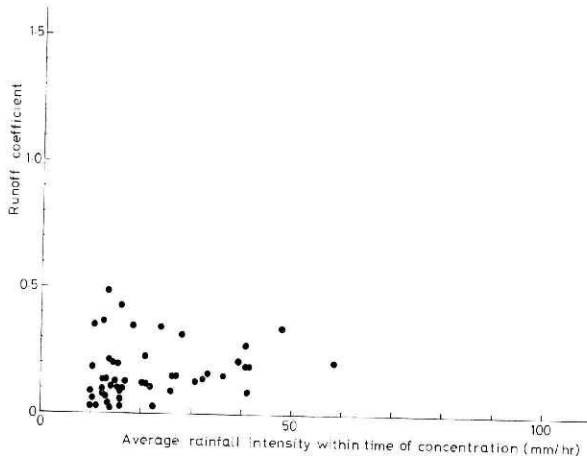


図 10b 自然流域の流出係数と洪水到達時間内平均降雨強度との関係, 浸透流域  
Fig. 10b Same as Fig. 10a except basins of high permeability

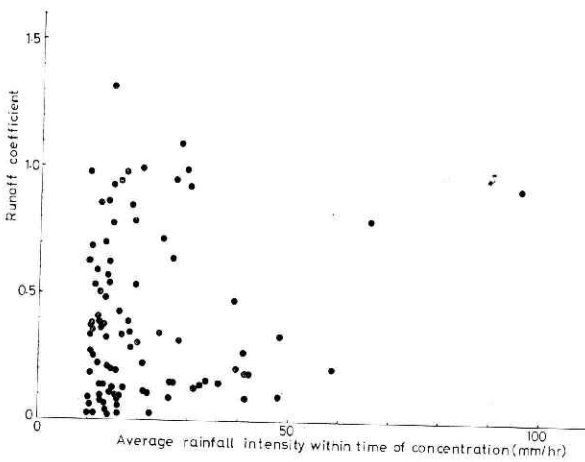


図 10c 自然流域の流出係数と洪水到達時間内平均降雨強度との関係, 非浸透流域  
Fig. 10c Same as Fig. 10a except basins of low permeability

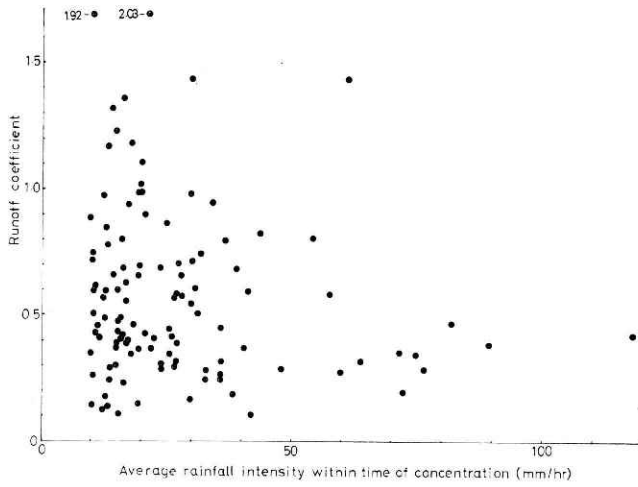


図 11a 都市流域の流出係数と洪水到達時間内平均降雨強度との関係, 全流域

Fig. 11a Relation between runoff coefficient and rainfall intensity within the time of concentration on all urbanized basins

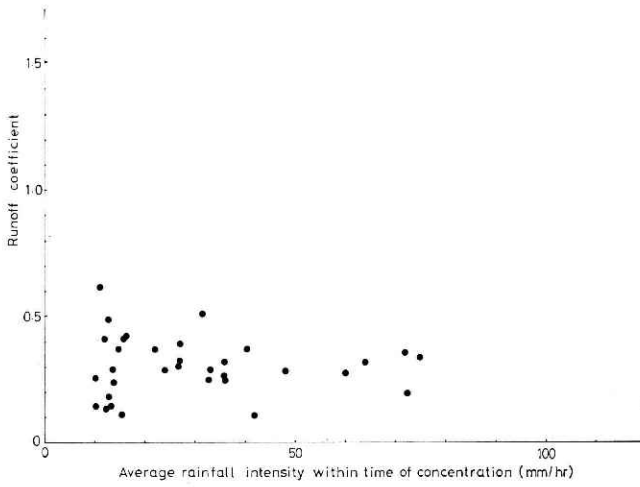


図 11b 都市流域の流出係数と洪水到達時間内平均降雨強度との関係, 浸透流域

Fig. 11b Same as Fig. 11a except basins of high permeability

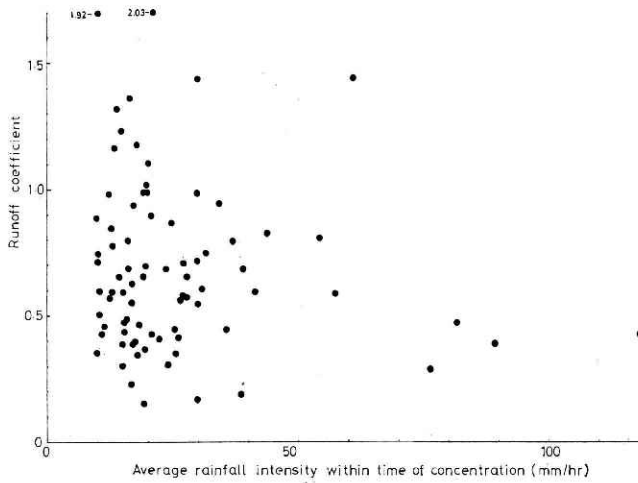


図 11c 都市流域の流出係数と洪水到達時間内平均降雨強度との関係, 非浸透流域

Fig. 11c Same as Fig. 11a except basins of low permeability

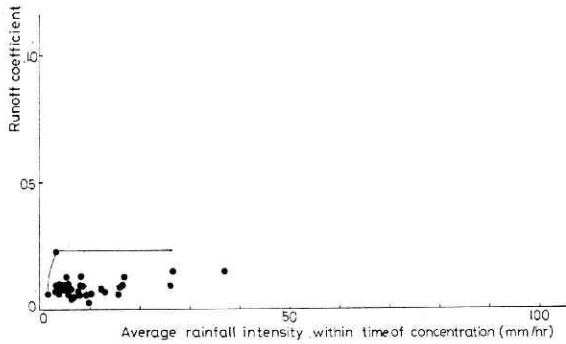


図 12a 自然流域の流出係数と洪水到達時間内平均降雨強度との関係，裏筑波（山口川および祖父ヶ峰）流出試験地

Fig. 12a Relation between runoff coefficient and rainfall intensity within the time of concentration in natural basin at Uratsukuba Experimental Basin (Yamaguchi River and Sofugamine)

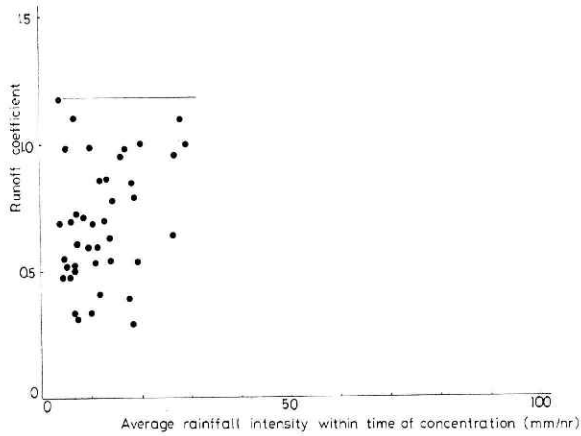


図 12b 自然流域の流出係数と洪水到達時間内平均降雨強度との関係，黒部川流出試験地  
Fig. 12b Same as Fig. 12a except Kurobe River Experimental basin



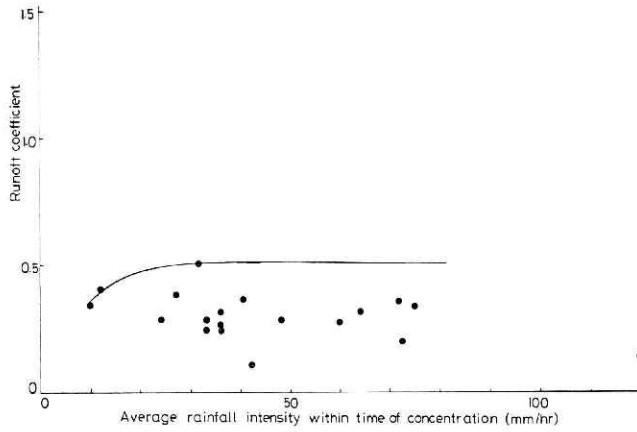


図 13a 都市流域の流出係数と洪水到達時間内平均降雨強度との関係，多摩ニュータウン（永山）流出試験地  
 Fig. 13a Relation between runoff coefficient and rainfall intensity within the time of concentration in urbanized basin at Tama New Town Experimental Basin (Nagayama)

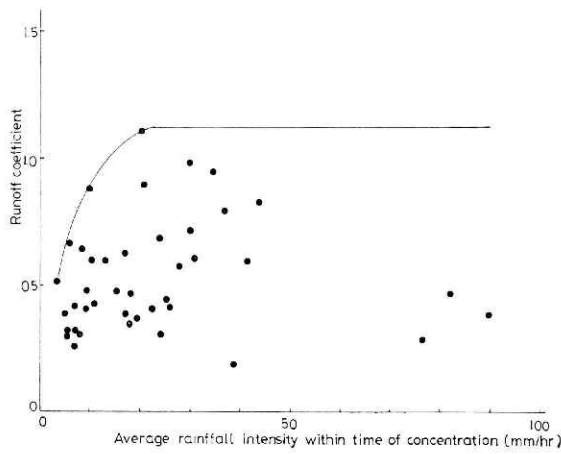


図 13b 都市流域の流出係数と洪水到達時間内平均降雨強度との関係，庄内川（山崎川）流出試験地  
 Fig. 13b Same as Fig. 13a except Shonai River Experimental Basin