

## 流域条件と洪水流出特性の変化に関する実験的研究(第一報)

——不浸透域の増大による洪水流下速度の増大——

佐藤照子\*・植原茂次\*\*

国立防災科学技術センター

### **Experimental Study on Changes of Runoff Characteristics due to Difference of Basin Conditions —— Increase of Flood Velocity due to Increase of impervious Area ——**

By

**Teruko Sato and Sigetsugu Uehara**

*National Research Center for Disaster Prevention, Japan*

#### **Abstract**

This paper describes an experimental study on the effects of changes of basin conditions due to urbanization on its runoff characteristics in a basin model, using a large-scale rainfall simulator in National Research Center for Disaster Prevention.

The dimensions of the basin model are 15 m in width and 40 m in length with 30 cm soil layer which consists of an upper 10-cm thick loamy soil layer and a lower 20-cm thick clayey soil. Basin slopes are given a 3% transverse inclination and a 1% longitudinal inclination, and a channel is set in the center of the basin. Changes of the basin condition are given by changing the coverage rates of sheet zincs from 0% to 25%, 50%, 75% and to 100% which simulates the increase of impervious area in a basin due to urbanization. Four rainfall types are supplied repeatedly : pulse, step, sine and modified actual rainfall types.

The following results are obtained on the relation between the increasing impervious area and runoff characteristics, especially depletion coefficients of hydrographs, namely accelerating runoff :

1. The depletion coefficient increases in accordance with the increase of effective precipitation due to the increase of impervious area.
2. The depletion coefficient increases in accordance with the decrease of the mean roughness of a basin model due to the increase of smooth impervious area.
3. The runoff rate reaches nearly 100% in the impervious area, while in the pervious area, it increases in accordance with the saturation rate of the upper soil layer.

---

\*第3研究部降雨実験室, \*\*第4研究部

## 1. はじめに

流域内の都市化が進む地域においては、流域内の土地利用の高度化と共に、洪水流出特性が変化し、洪水被害が増大している。

従来から、都市化域の洪水流出機構の変化を探るために、都市化が進行する地域に流出試験地を設け、得られた水文資料をもとに、流域の都市化と洪水流出特性の変化について調査が進められている。実際の流域では、流出にかかわる要素が複雑に絡みあっており、その結果としての流出量が測定される。不浸透域だけの影響をとりだすことは難しい。しかも、適切な降雨も得にくい。また、長期にわたる水文観測を必要とする。更に、開発地域では、土砂流出や、河道改修に伴う、水文観測施設の移動等、観測を阻害する様々な困難がある。

そこで、流域の開発に伴って起こる様々な変化のうち、排水路密度の増加と並んでもっとも流出に影響を与えると考えられる流域内の不浸透域の増加という要素だけをとり出し、実験的に洪水流出特性の変化を再現した。浸透域上に不浸透域を配置し、単純化された状況で実験を行って、それが洪水流出特性に与える基礎的な影響を実験的に検証することとした。不浸透域の増加は、その不浸透域からの表面流出が、雨水排水路等によって、河道とつながって始めて、洪水流出へ影響を与える。この場合の不浸透域が洪水流出へ与える影響を整理すると、表1のようになる。

この実験では、不浸透域の増加に伴う洪水流出特性の変化のうち

- (1) 有効雨量の増加による洪水流出量増大と洪水流下速度の増大
- (2) 流域の平均的な粗度の減少による洪水流下速度の増大
- (3) 洪水流下速度増加に伴うピーク流量の増大

の各現象を実験的に再現しその変化の様子を観察した。

ここでは、実験の概要と今まで得られた成果の概要を報告する。

## 2. 実験概要

実験は、表2に示すように、実験I(1983年9月)、実験II(1984年6月)、実験III(1985年6月)に分けて行われた。実験Iと実験IIとの間には、流域模型の集水路の改修工事が行われている。

表1 不浸透域の増加が洪水流出特性へ与える影響

Table 1 General concept of contribution of increase of impervious area to runoff process

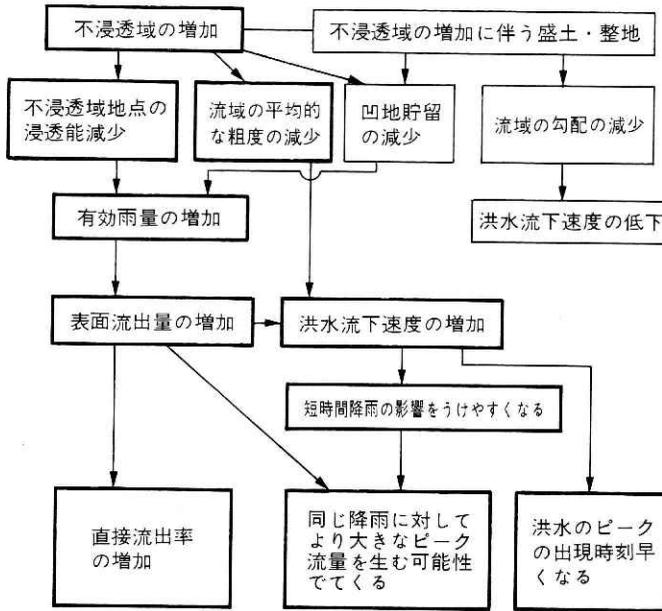


表2 実験条件表

Table 2 Table of experiments

入力降雨については2.3.2参照

\*印 今回の報告に用いたもの

実験 番号	流量の 計測	不浸透域 の配置	土湿不足が大きい状態で 開始した実験					土湿不足が小さい状態で 開始した実験					備考		
			入力 降雨	不浸透面積率(%)					入力 降雨	不浸透面積率(%)					
				0	25	50	75	100		0	25	50		75	100
I	直角三角堰	下流 ↕ 上流	P30	○	○	○	○	—	P60	○	○	○	○	—	
			P90	○	○	○	○	—	P120*	○	○	○	○	—	
									R30*	○	○	○	○	—	
									R60*	○	○	○	○	—	
									C120	○	○	○	○	—	
									C100	○	○	○	○	—	
II	電磁流量計 (直角三角堰)		P120*	○	—	○	○	○							
			C120	○	—	○	○	○							
		(非接続)	P'120	—	—	○	—	—							
III	電磁流量計 (直角三角堰)	上流	P60	○	○	○	○	○	S80	○	○	○	○	○	集水路水深計測
		下流	C120	○	○	○	○	○							

## 2.1 実験装置

本実験は国立防災科学技術センターの大型降雨実験施設(散水面積 $3,024\text{m}^2$ , 散水強度の範囲は $15\text{-}200\text{mm/h}$ )を用いておこなわれた。

大型降雨実験施設内に, 実流域を想定した大型の流域模型を作成した(写真1)。この流域模型の流域面積は $6\text{a}$ (幅 $15\text{m}$ , 河川方向長さ $40\text{m}$ )である。

流域模型は, 複雑な実流域を相似率で縮めたものではなく解析しやすい形状に作った。即ち, 図1に示すように, 流域模型は2つの向い合う矩形斜面(勾配 $3/100$ )で構成され, 中央に集水路(勾配 $1/100$ )を設けた。流域模型は,  $10\text{cm}$ 厚のローム層で覆われている。その下には粘土層があり, 難透水層となっている。集水路は塩ビの角トイを使用し, 一度浸透してから集水路に到達した雨水も集められるように,  $20\text{cm}$ おきに, 角トイの底と側方に直径 $1\text{cm}$ の穴をあけ, 角トイの周囲に砂をつめた。

流域内の不浸透域の増加は, ローム層の上に亜鉛板を敷くことによって模擬した。

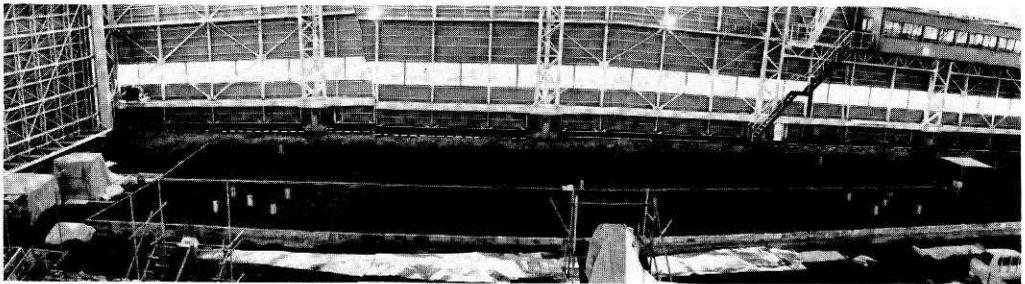


写真1 流域模型全景  
Photo. 1 View of model basin

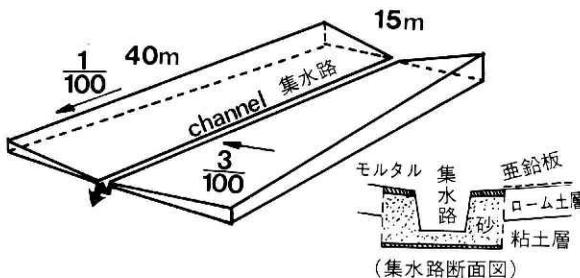


図1 流域模型図  
Fig. 1 Basin model

## 2.2 測定方法

不浸透域の増大に伴う、洪水流出量の時間変化を測定するために、不浸透面積率と入力降雨を変えて実験を行い、入力降雨、流出量、浸透域の含水比、集水路水位(実験III)の測定を行った。計測値は、ペン書きレコーダーにより記録紙上に連続記録した。これを、デジタイザーを使い5秒間隔で読み取った。計測器の配置については、図2に示す。

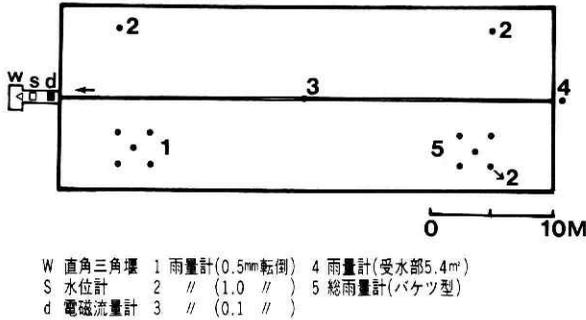


図2 計測器配置図

Fig. 2 Location of measuring instruments

### 2.2.1 入力降雨

降雨量の測定は、図2中に示したように10台の転倒ます型雨量計(0.1mm転倒1台, 0.5mm転倒5台, 1.0mm転倒3台, 雨量計(受水部面積5.4m<sup>2</sup>)1台)を用いて行った。降雨を散水するノズルの配置のため、各雨量計毎のように、ごく狭い範囲で見ると、雨量は若干異なる。しかし面的に広がりを持って降雨量を見ると、求める降雨強度の雨がほぼ得られている。今回の報告で、用いた降雨量は、図2の中に1と示した0.5mm転倒の5台の平均値である。

### 2.2.2 流出量

流出量の測定は集水路末端にて行った(写真2)。実験Iでは、直角三角ゼキで行った。直角三角ゼキは、セキの越流深から、セキの公式を使って流量を求めた。しかし、整流槽が広いと、水位が上昇及び下降する時に時間遅れが生じる。そこで、ハイドログラフ作成時には、その貯留効果を補正する必要がある。求める流量までの変換過程数が多く、誤差が生じやすい。そこで、実験II、実験IIIでは、流量を時間遅れなく測れる電磁流量計を導入した。実験Iについては直角三角ゼキのデータを用い、実験IIとIIIについては、電磁流量計の値を用いている。

### 2.2.3 その他

集水路の水位(実験III)測定、浸透域の土層の含水比{(土に含まれる水の重量/土の重量)×100}の測定も行った。

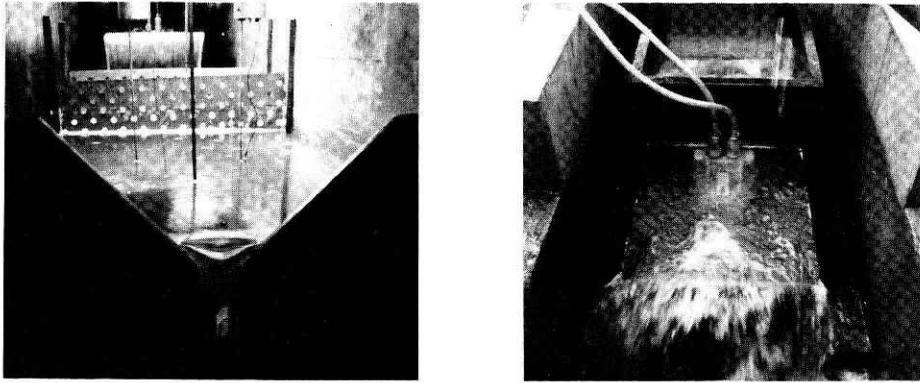


写真2 流量計測部(左 直角三角ゼキと触針式水位計, 右 電磁流量計)  
 Photo. 2 Magnetic discharge meter(right) and weir (left)

### 2.3 実験条件

不浸透域から生じた流出が、道路側溝や公共の雨水排水路を経て下流地点での流量増加に結びつく場合を仮定し、以下の様な不浸透域及び降雨条件のもとで実験を行った。

#### 2.3.1 不浸透域

不浸透域は、流域模型に亜鉛板を敷くことによって作った。不浸透域からの流出が直接に集水路に及ぶよう、亜鉛板の末端が集水路と接続するようにした。不浸透域は、その面積率を、0、25、50、75、100%と変えた。不浸透域は実験I、実験IIでは下流域から、実験IIIでは上流側から順に増加させていった。(図3参照)

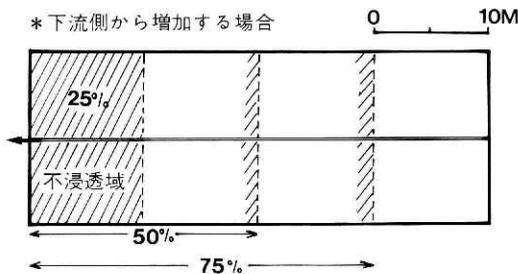


図3 不浸透域の配置図  
 Fig. 3 Location of impervious area

#### 2.3.2 降雨条件

入力降雨波形は、次の通りである。(図4参照)

(Pタイプ)パルス波状 一定降雨強度の雨を5分ずつ、20分間隔で何度か降らせる

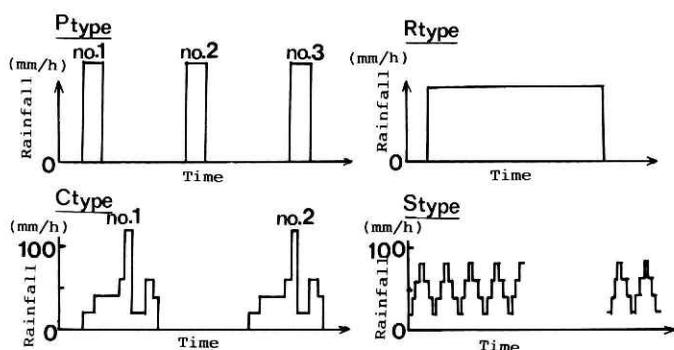


図4 入力降雨タイプ

Fig. 4 Rainfall types

(Rタイプ)ステップ波状 一定降雨強度の雨を流出量が平衡状態になるまで降らせる

(Sタイプ)正弦波状 正弦波状の雨を降らせる

(Cタイプ)複合波 自然の降雨のパターンをまねた、2つのピークをもつ降雨を20分間隔で2回降らせるもの

P及びCタイプでは、浸透域の土湿不足解消に伴う流出波形の変化をみるために、繰返し同じ波形の降雨を降らせた。降雨強度としては30-120mm/hを用いた。

### 2.3.3 入力降雨波形の表示方法

P90.1(III)75%のように入力降雨波形を書く。

- 英字 : 降雨のタイプ
- 数字 : 降雨強度, 従って90は90mm/hを表わす。S, Cタイプの場合は, 最高降雨強度を表す。
- 小数点以下の数字: P, Cタイプの場合同じ波形を数十分間隔で何度か降らせている。この場合に, 第一番目の降雨から, No.1, No.2, No.3と呼び, その番号を示す。
- (アラビア数字) : 実験番号 I, II, IIIを示す。
- 数字% : 不浸透面積率

### 2.3.4 浸透域の土湿不足(脚注\*)

#### \*土湿不足

土壤水帯中の毛管孔隙は, 大雨の降り終わった後は, 全て雨水で満たされている。すなわち飽水しており, この状態を野外容水量の状態と呼んでいる。天気が回復して晴天が続くと, 地表面, 並びに地面に口を開いた毛管孔隙を通して, 毛管孔隙中の毛管水が大気中に蒸発して行き, また植物は, その根を通して毛管孔隙中の毛管水を吸い上げて, 葉面から蒸発させて行く。従って, 最初は飽水していた毛管孔隙も, だんだん空の部分が増していく。この状態を土湿不足の状態と呼ぶ。(岡本芳美(1982):技術水文学より)

実験開始前の浸透域の土湿不足の状態について述べる。

- (実験Ⅰ) 土湿不足が大きい状態から実験を開始しているのはP90, P30である。他は湿潤状態から開始している。
- (実験Ⅱ) 浸透域の、実験開始前の土湿不足が、できるだけ同じになるように実験は一定の間隔(一週間毎)で行った。図5に実験開始前の浸透開始前の浸透域の含水比を示すが、場所毎に含水比は多少異なっているが、その分布範囲は、いずれの不浸透面積率でもほぼ一定している。実験開始前の土湿不足は、ほぼ同じ状態と考えてよい。
- (実験Ⅲ) P60とC120は土湿不足が大きい状態から開始し、S80は湿潤状態から開始している。

尚、いずれの実験においても、P, Cタイプの降雨の時のNo.1～No.3へと土湿不足の状態が解消していく。

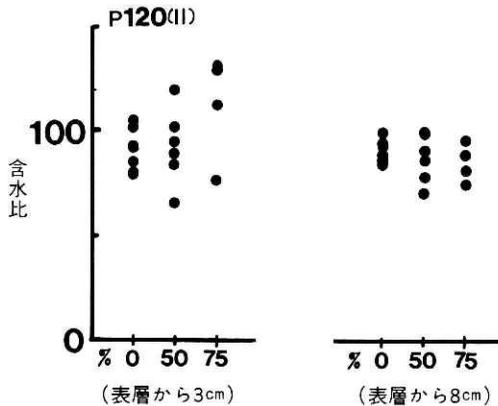


図5 実験Ⅱ開始前の浸透域の含水比  
Fig. 5 Water content in percent of dry weight before Experiment-II

### 2.3.5 その他

集水路の破損のため実験Ⅰと実験Ⅱの間に集水路補修工事を行った。更に、模型のローム土層部分にローム土をつぎたした。そのため、実験Ⅰと実験Ⅱでは、模型条件及び土質条件が少し変わってきている。

また、実験Ⅱと実験Ⅲの間にも時間があり、雑草等の根により、土質条件は若干変化している。

## 3. 実験の結果及び考察

実験の一覧を表2に示す。この報告では、表2の中から\*印の実験結果を用いて、流域内の不浸透域の増加が洪水流出特性へ与える影響のうち災害を激化させる方向に働く、次の特徴のある現象について述べる。

- (1) 有効雨量の増加に伴う洪水流量の増大や洪水流下速度の増大
- (2) 流域の平均的な粗度の減少による洪水流下速度の増大
- (3) 洪水流下速度増大に伴うピーク流量の増大

尚、以下の報告では、特にことわらない限り、流域末端の流出量との関係で現象の変化を見ており、斜面と集水路の影響を分けずに述べている。

### 3.1 有効雨量の増大

総洪水流出量は、総量を扱っているのので、試験流域から得られた、現地水文観測資料からも解析しやすい。都市域における流出率は、総雨量が小さい時、流域内の不浸透面積率とほぼ同じ値を示すことが現地水文観測資料の解析により確認されている。

図6に、実験データから、不浸透面積率の異なる流域からの流出率を示す。入力波形は、

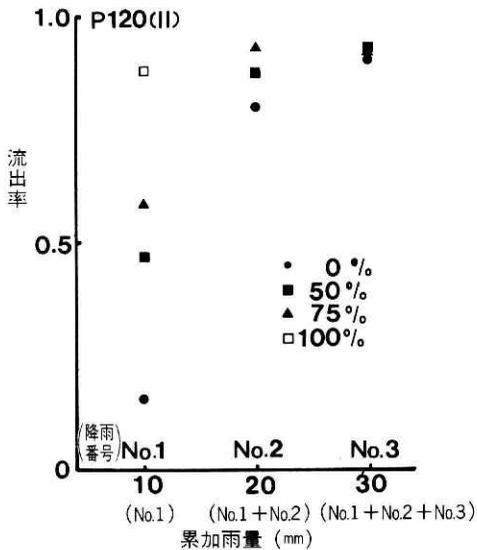


図6 不浸透域の増加と流出率の増大

Fig. 6 Runoff rate induced by various impervious area's rate

P120(II) (120mm/h × 5分, 総雨量10mm)である。前項で述べたように、実験IIでは、実験の間隔を調整し、同じ様な土湿不足の状態から実験が開始できるようにしている。

ここで用いた流出率は(総流出量/総雨量)である。すなわち、総流出量は、降雨開始から15分間の流出量を積算したものである。15分後に流出が続いている場合もあるが、全部同じ15分間にした。また、浸透した雨水も集水路に流出するようになっており、浸透域が大きいと基底流出に相当するような流出もみられたが、ここでは、分離していない。総雨量とは、各入力降雨(No.1 ~ No.3)毎の総雨量である。

各不浸透面積率ごとに、No.1からNo.3まで3つの流出率が示されている。図中の累加雨量と

は、No.1～No.3の降雨を一続きの雨とみた時のものである。いずれの不浸透面積率でも、累加雨量が増加し、浸透域の土湿不足が解消するにつれてNo.1～No.3へと流出率は増大している。また、浸透域の土湿不足解消に伴い、表面流出の発生域は、次のように、拡大していく。

P120.1：表面流出の発生域は、不浸透域であり、入力降雨の最後頃に、  
浸透域の一部に発生域が拡大する。

P120.2：浸透域上の表面流出発生域は、拡大しつづける。

P120.3：浸透域上の表面流出発生域は、全域にすぐ拡大する。

浸透域(不浸透域0%)の流出率の変化を見ると、0.16, 0.80, 0.90と土湿不足が解消するにつれて、上昇している。

一方、不浸透域の増大は、累加雨量が少なくても、すぐに流出が生じる地域を作り出すことになる。不浸透面積率100%のP120.1(II)の流出率は0.88である。1.0に少し足りないのは、不浸透域が乾燥している状態から出発しているため、初期損失が生じているためと考えられる。P120(II)100%は1回しか降らせていない。

流出率を、不浸透域と浸透域の流出率で次のように表すと、

$$R_t = R_i \times A_{imp} + R_p \times A_p \quad (1)$$

$R_t$ ：流域全体の流出率  
 $R_i$ ：不浸透域の流出率  
 $A_{imp}$ ：不浸透面積率  
 $R_p$ ：浸透域の流出率  
 $A_p$ ：浸透域面積率(1- $A_{imp}$ )

不浸透域の流出率( $R_i$ )は、若干の初期損失を除くと、累加雨量や流域の土湿不足の状態にほとんど左右されずに安定した値を示すので、不浸透面積率( $A_{imp}$ )の増大に比例して( $R_i \times A_{imp}$ )は増加する。比較的安定しているこの値( $R_i \times A_{imp}$ )を、以下、下限流出率と呼ぶことにする。下限流出率増加の様子が図6のNo.1降雨にみられる。不浸透面積率が大きくなるに従い、No.1の流出率が、0.16, 0.47, 0.59, 0.88と増えている。

一方 $R_p$ は、流域の中の浸透域の土湿不足の状態によって、その値を大きく左右される。しかし、累加雨量が大きくなり、表面流出が発生するようになると不浸透域と同じ様な流出率を示すようになる。No.3降雨では、浸透域全体から表面流出が起これ、不浸透面積率の違いによる流出率の差はみられない。

不浸透域の増大は、累加雨量の多少にかかわらず、安定した下限流出率を増やす。つまり、有効雨量を増加させる。このことは、降雨初期における累加雨量の少ない時の流出を確実にものにし、流出量を増大させる。また、流出量の増大は、大きなピーク流量を引き起こす可能性を与える。更に、後で述べるように、洪水流下速度の増加にも影響する。

不浸透面積率増大の影響の差が、一番大きく現れるのは、下限流出率が現れている時である。

### 3.2 洪水流下速度の増加

不浸透域の増加に伴う洪水流下速度の増加の原因は、(1)有効雨量の増大によるものと、(2)流域平均粗度の減少によるものに、大別できる。

各々の要因の影響が比較できるようなハイドログラフを抽出し、その下降部から、低減係数を求め、その変化と不浸透面積率との関係から、(1)、(2)と洪水流下速度増加との関係を見る。

ハイドログラフの下降部は、流域の持つ流出特性が現れる。その特性を、表現するのに低減係数( $k$ )がよく使われる。ハイドログラフの減水部について、指数低減を仮定し、その減水特性を(2)式のように指数関数で表す。 $k$ を低減係数と呼ぶ。ハイドログラフの下降部は、いくつもの低減特性を持つ指数曲線で近似できるとされている。実験で得られたハイドログラフもその下降部を指数低減で近似できた。

$$Q_t = Q_0 e^{-kt} \quad (2)$$

$Q_0$  : 指数曲線上のある時点の流量

$Q_t$  :  $Q_0$ の時点より  $t$ 秒後の流量

$e$  : 自然対数  $e$ の底

$k$  : 低減係数

この章では、ハイドログラフのピーク直後の急な下降部から  $k$ の値を求めている。

低減係数( $k$ )の逆数( $1/k$ )は時定数である。低減係数の増加は、時定数の減少となる。ここでは、地表面を流れ下る雨水の流れに注目しており、時定数の短縮は、この流れの速度が大きくなることを意味する。以下、この地表面を流れ下る雨水の速度を、洪水流下速度と呼ぶ。

#### 3.2.1 有効雨量の増大によるもの

不浸透域の増加の影響が最も顕著に現われるのは、下限流出率が現れる様な、浸透域の土湿不足が大きく、不浸透域からだけ流出が生じている時である。この不浸透域の大ききの影響がもっとも大きく現われる場合について、不浸透域の増加に伴う、有効雨量の増加と洪水流下速度の増大との関係を調べる。

そこで、実験一覧表の中から、散水を流域の土湿不足が大きい状態から開始していて、下流から不浸透域が拡大しているP120.1(II)とP90.1(I)のハイドログラフを用いる。

図7に実験P120.1(II)で得られた不浸透面積率の異なる流域(50, 75, 100%)からの3つのハイドログラフを時間を重ねて示す。破線は入力降雨波形を示す(入内降雨波形と実際降った雨では若干異なる)。前述の様に、No.1降雨では表面流出の発生域は、不浸透域のみに観測された。但し散水終了頃一部浸透域にも表面流出の発生域が拡大しているのが観測されている。不浸透面積率が増加すると、同じ入力降雨に対して、より大きなピーク流量が発生している。また、不浸透面積率が大きい程ハイドログラフの上昇部は急峻になり、同じ累加雨量(同じ経過時間)に対して、より大きな流出量を出現させるようになる。下降部の傾きも不浸透面積率増加と共に大きくなり洪水流下速度が増加しているのが分る。

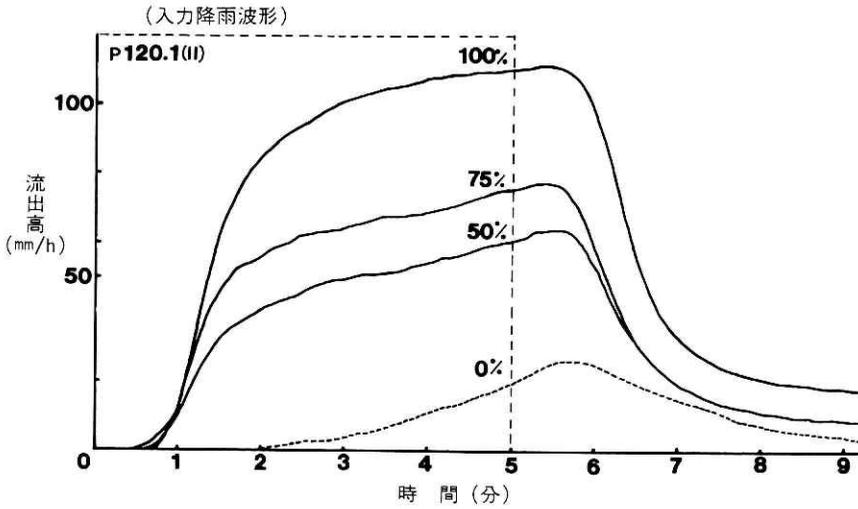


図7 有効雨量増加に伴うハイドログラフの変化  
 Fig. 7 Comparison of hydrographs induced by increase of effective precipitation

図8にはP120.1(II)とP90.1(I)の低減係数が不浸透面積率と共に変化する様子を示した。P90.1(I)の降雨強度の方が低減係数が大きいが、これは実験年度が異なり流域模型の土質条件等が異なるためである。また、P120.1(II)では不浸透面積率25%、P90.1(I)では100%のデータがない。しかし両者は同じ傾向を示すと言ってもよいであろう。不浸透域の増大と共に、低減係数が増加しているのが分かる。P90.1(I)の不浸透面積率25%の低減係数を1とすると、不浸透域が2倍(50%)になると、1.7倍、不浸透域が3倍(75%)になると1.9倍の値を示している。この値は、不浸透面積率の0.5~0.6乗に比例して増加している。

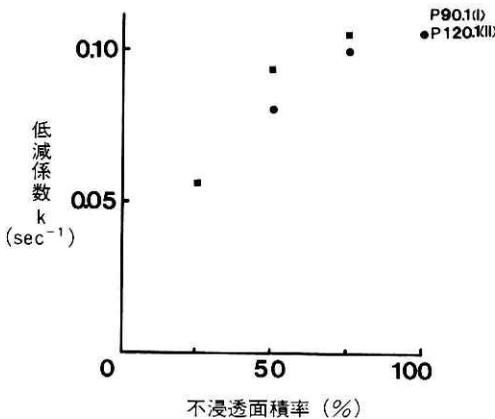


図8 有効雨量増加に伴う低減係数の変化  
 Fig. 8 Changes of depletion coefficients induced by increase of effective precipitation

下流側から、不浸透域が流域幅全体にわたって、上流に向って拡大している時(図3参照)、しかも浸透域の土湿不足が大きく下限流出率が生じているような時、表面流出発生域の拡大による有効雨量の増加は、低減係数を増加させる。すなわち、洪水流下速度を増加させている。

### 3.2.2 流域平均粗度減少の影響

道路等の不浸透域の出現は有効雨量を増大させるばかりではなく、流域のその地点の(表面の)粗度を減少させる。雨水の流れは、粗度の関数であるので、地表面を流れる雨水の流下速度を早める。流域内の不浸透域の増加に伴って、粗度の低い地域が増へ、流域全体として平均的な粗度が減少する(以後、流域平均粗度とよぶ)。実験結果から、不浸透面積率の増大に伴う流域平均粗度の減少による洪水流下速度の増加について調べる。

流域平均粗度の減少による洪水の流下速度の違いだけを取りだすため、表面流出が生じている面積が同じように、おおむね、流出率1.0に近いハイドログラフを用いた。そこで、降雨強度が小さい場合には、流出が平衡状態になるまで、入力続けるRタイプを、降雨強度が大きい場合には、Pタイプ(P90, P120)のNo.3降雨を用いた。

図9に、入力降雨P120.3(II)(120mm/h×5分)、不浸透面積率0, 50, 100%の、ハイドログラフを示す。流出率・ピーク流量ともほぼ同じ値を示す場合でも不浸透面積率が0, 50, 100%と増加すると、流域平均粗度の減少によって、洪水流下速度が増加し、ハイドログラフの上昇部・減水部とも急になる様子が分かる。

減水部を前項の様に、低減係数で表現し、不浸透面積率と降雨強度別に比較したものが図10である。降雨強度は入力降雨波形で示している。

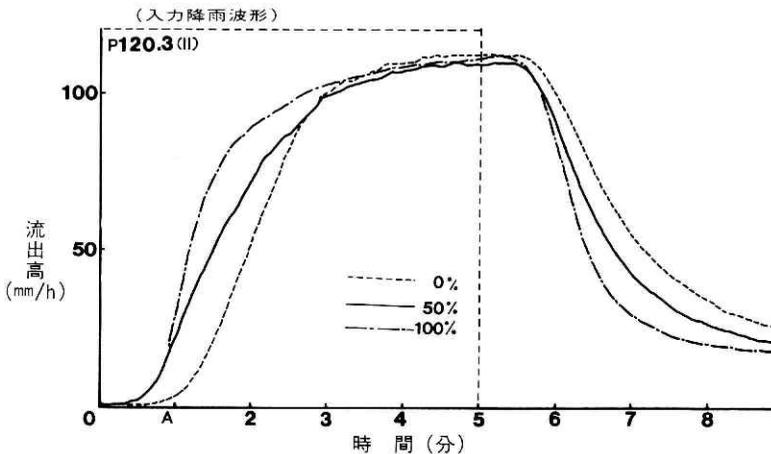


図9 流域平均粗度低下とハイドログラフの変化

Fig. 9 Comparison of hydrographs induced by decrease of mean roughness of a basin model

各降雨強度共、流出が平衡状態になった後の減水部を用いているので、不浸透面積率が違ってても、同じ入力波形ならばピーク流出量は、同じであるが、不浸透面積率の増加と共に低減係数が増加し、洪水流下速度が増加しているのが分かる。また降雨強度が大きい方が低減係数が大きく、その変化幅も大きいようにみえる。

低減係数は同じ降雨強度の時、不浸透域0%と100%の示す低減係数(それぞれ $k$  0%,  $k$  100%と書く)の間で変化することになる。図10を見ると、P120.3(II)とP90.3(I)とR30(I)は、下に凸の曲線のようにみえる。しかし、他は、残念ながら $k$  100%のデータがないため、はっきりとその傾向が分からない。図10中の右下に示した、P120(II)のNo.1～No.3への低減係数の変化をみると、P120.3(II)の値は、それほどおかしくない値と考える。

ここでは、傾向のはっきりしていない点についての検討は、後の課題とし、P120.3(II)の低減係数と不浸透面積率増大との関係を調べておく。各不浸透面積率の低減係数は、 $k$  0%と $k$  100%の値の間で変化する。両者の間での差( $k$  100% -  $k$  0%)に対して、各不浸透面積率の低減係数( $k_{imp}$ )と $k$  0%との差( $k_{imp} - k$  0%)をとり、その比を求める。その値は、50% : 0.22, 75% : 0.53, (そして図10中から読みとった $k$  25%より求めると)25% : 0.084となる。この値は、不浸透面積率の増大とともに指数関数的に増加しているようにみえる。

不浸透面積率増加に伴う流域平均粗度の減少によって洪水流下速度が増加する。その変化の範囲は、不浸透面積率0%と100%のもつ値の間である。

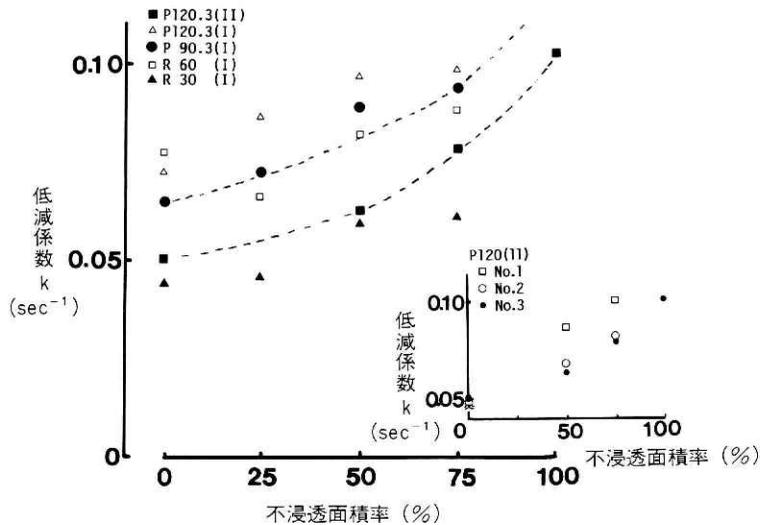


図10 流域平均粗度の低下と低減係数の変化

Fig. 10 Increase of depletion coefficients induced by decrease of mean roughness of basin model

### 3.3 洪水流下速度増大とピーク流量増加

ハイドログラフの減水部を用いて、不浸透域増大に伴う、洪水の流下速度の増大についてみてきた。洪水流下速度の増大は同じ降雨量に対して、ピーク流量の増大を引き起す。ここでは、流域平均粗度の違いから生じる洪水流下速度増大に伴う流出量増加の様子を調べる。

#### 3.3.1 洪水到達時間以上にわたり一定降雨強度の雨がある時

実験を、流域の土湿不足が満たされた状態から開始し平衡状態の流出が生じるまで、同じ降雨強度の雨を加えた時のハイドログラフ(流出率おおよそ1.0)の上昇の仕方をみる。そこで、P120.3(II)の不浸透面積率0, 100%の上昇部から次のような値Cを求める。

Cは、2つのハイドログラフの上昇部において、実験開始から5秒毎の同時刻の流出量を、不浸透域0%の流出量を1として、100%の流出量を、その比で表したものである。即ち次のようにCを表せる。

$$C = \frac{q_{t \text{ imp}}(\text{imp}=100\%)}{q_{t \text{ imp}}(\text{imp}=0\%)} \quad (3)$$

$t$ : 降雨開始からの時刻

$\text{imp}$ : 不浸透面積率

$q_{t \text{ imp}}$ : 不浸透面積率 $\text{imp}$ の流域からの時刻

$t$ における流出量

図9のハイドログラフからも分かるように、100%では、他に比べて急激に立ち上がり平衡状態に急速に近づいている。0%では、100%に比べると徐々に上昇している。この様子をCの値で調べると図11のようになる。

Cの値が大きいことは、降雨開始から同じ経過時刻(同じ累加降雨量)に対して、より大きい流出量が出現していることを表す。Cの値は、一定値を示さず、降雨初期には次第に大きくなり、流出が平衡状態に近づくとつれて、また下がってくる。

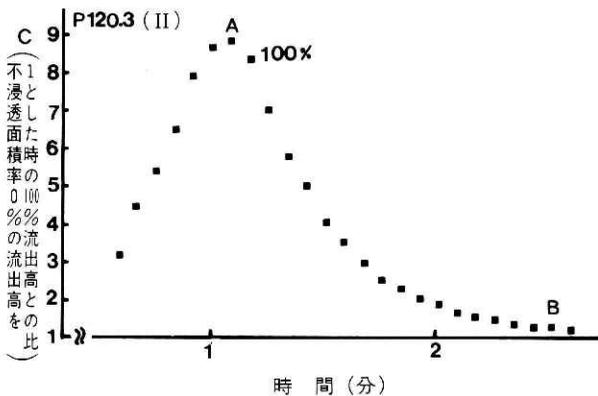


図11 洪水上昇部の上昇率の比較

Fig. 11 Difference of ascending rates of discharge

A点(極大値)の位置を図9に示している。この時不浸透域0%では、流出量はわずかである。不浸透域100%から急激に流出が生じている。浸透域上では、充分土湿不足が満たされた状態で、降雨を入力しても、短い無降雨期間に若干の土湿不足のもどりがあり、表面流出が生じるまでにわずかのおくれがあると考えられる。Cには、流域平均粗度の違いによる流出量の差だけではなく、不浸透域と浸透域という質的に異なる流域からの流出量の差という意味あいと含まれるということになる。

A点からほとんど流出量の差のなくなるB点までの間では、累加雨量のすくない方が、より大きな流出量の差を生じさせている。B点付近では洪水到達時間近くまで雨が降り続いており、この時点では、いずれの場合も全流域からの流出が集中することになるので、洪水流下速度の相違による流出量の差はすくなくなる。

図10からも分かるように、P120.3(II)の減水係数 $k100\%$ と $k0\%$ では、2倍近くその値が異なっている。100%の流出量は、同時刻(同降雨量)に対して0%より大きな流出量でB点近くまで続き、最大9倍もの流出量の差を生じている。このように、洪水流下速度の増大は、同じ降雨量に対して、より大きな流出量を出現させる。但し、その影響の現れ方は、降雨の継続時間と共に変化していく。また、降雨強度が一定の雨が、その流域の洪水到達時間以上降り続けば、洪水流下速度の大きさにかかわらず、同じ流出量が生じる。

### 3.3.2 洪水到達時間内に降雨強度が変化する時

前項の3.3.1では、同じ降雨強度の雨を流出量が平衡状態に近づくまで与えているので、同じ降雨入力波形については、不浸透面積率にかかわらず、同じピーク流量が出現する。そこで、ハイドログラフ上で洪水流下速度の違いによる、ピーク流出量及びピーク出現時間の差をみるために、図12には、正弦波状の降雨S80(III)を入力として与えた時のハイドログラフの一部を示す。

不浸透面積率は0%と100%である。両ハイドログラフとも表面流出が流域全体から生じており、流出率はおおむね1になった時のハイドログラフの部分を各々抽出し重ねてある。不浸透域0%と100%の流域からの流出ハイドログラフを比較すると位相は少しずれるが周期は、同じで、振幅が異なっている。洪水流下速度が大きい不浸透面積率100%の方のハイドログラフの上昇部、下降部共急であり、大きなピーク流量を形成し、ピークの出現時間も早くなっているのがわかる。降雨強度は増加している時の方が、つまりハイドログラフの上昇部の方が下降部より、0%と100%との差が大きい。洪水流下速度の差は、ハイドログラフの立上り時間、ピーク流量に影響することが分かる。

### 3.4 浸透域と不浸透域

(1)不浸透域増大に伴う流出量の増大による洪水流下速度の増大、及び(2)流域平均粗度の減少による洪水流下速度の増大について述べてきたが、同じ不浸透面積率の時には、両者は

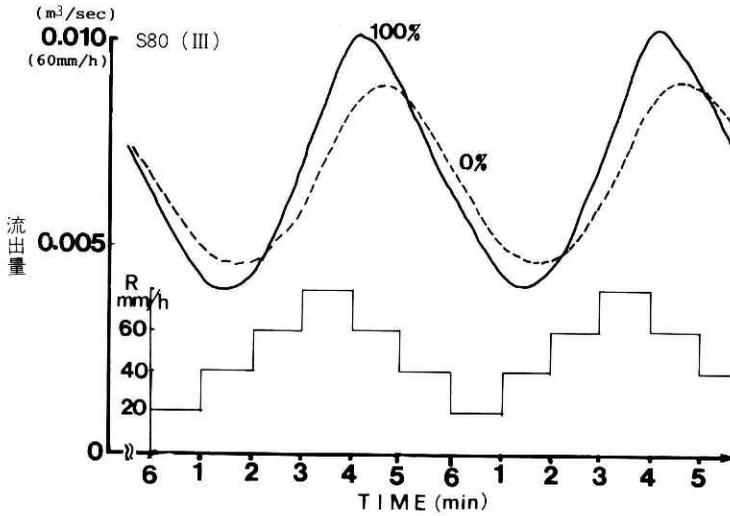


図12 洪水流速の違いをあらわすハイドログラフ(一部分)

Fig. 12 Hydrographs showing difference between peak discharges

どう現れるかについて実験データから述べる。

不浸透域と浸透域が混在している場合には、浸透域の土湿不足の状態によって、表面流出が生じる場所・面積が異なり、同じ降雨に対しても異なったハイドログラフを生じる。浸透域の土湿不足がすくなくなるにつれて、表面流出が生じる部分は、不浸透域の部分だけから、次第に浸透域全域へと拡大していく。表面流出発生域の拡大は、同じ入力降雨に対してより大きな流出量を生じさせる。表面流出発生域の不浸透域から浸透域への拡大は、表面流出の発生場を粗度の小さい領域から大きい領域へも拡大し、流域平均粗度を大きくする。

実験データP90(I)から、降雨開始前の土湿不足の違うハイドログラフの減水部から低減係数の変化を図13に示す。左側の丸(A)が土湿不足が大きく不浸透域からだけ表面流出が生じている時、右側の丸(B)が流域全域から表面流出が生じている時である。不浸透面積率が小さい25%では、Bになると表面流出発生域はAの4倍近くなる。流出量が大きくなる影響を受け、低減係数が増加する。一方不浸透面積率が大きくなると、流出量増加よりも表面流出発生域の浸透域への拡大に伴う、流域平均粗度の増加の影響をより受け、低減係数は減少する。

同じ不浸透面積率の時、土湿不足解消に伴う表面流出発生域の浸透域への拡大時の減水定数の変化は、不浸透面積率によって異なっている。

実験では表面流出に着目しているので、このような結果となっている。しかし、実際の流

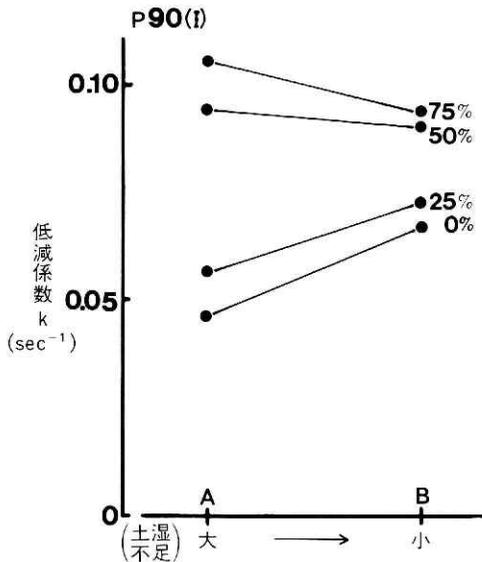


図13 浸透域の土湿不足と低減係数の変化

Fig. 13 Comparison of depletion coefficients corresponding to each saturation rate of pervious area

域ではどうであろうか。図14に不浸透面積率22%の筑波学園流出試験地・上の室地点(流域面積12.5km<sup>2</sup>)のデータから、総雨量の異なる3洪水のハイドログラフを示す。流量を、対数で表示しているので、低減係数は、減水部のハイドログラフの傾きで表示できる。小雨では雨水排水路が整備された不浸透域からの流出が大部分を占めると考えられる。そのため、表面流出が発生している場の粗度の影響により小さな雨の方が、低減係数が大きくなっている。また、洪水Cのように長く続く大雨では、表面流出の発生場所の拡大もあるが、一度浸透してから流出する時定数の長い流出成分が加わるため、短時間降雨が大きいものにもかかわらず、ピークからの減水がゆるやかになっていると考えられる。実験において不浸透面積率25%の時、みられたような表面流出発生域の拡大に伴う低減係数の増加という現象は、実際のハイドログラフの減水部からは抽出しにくい。

#### 4. 結 論

本報告では、当センターで行った『流域模型を用いた流出実験』の概要と今まで得られた実験結果の概略を述べた。その内容は、次の様に要約できる。

- (1) 大型の流域模型(浸透域+不浸透域)を用いて、流域条件の変化と洪水流出特性変化について実験的研究を行った。
- (2) 不浸透域の増大と洪水流下速度の増加について次の様な現象がみられた。
  - 1) 実験では、不浸透の増加に伴う洪水流下速度の増大という現象を、原因別に分けて再現することができた。すなわち、(a)有効雨量増大によるものと、(b)流域平均粗度

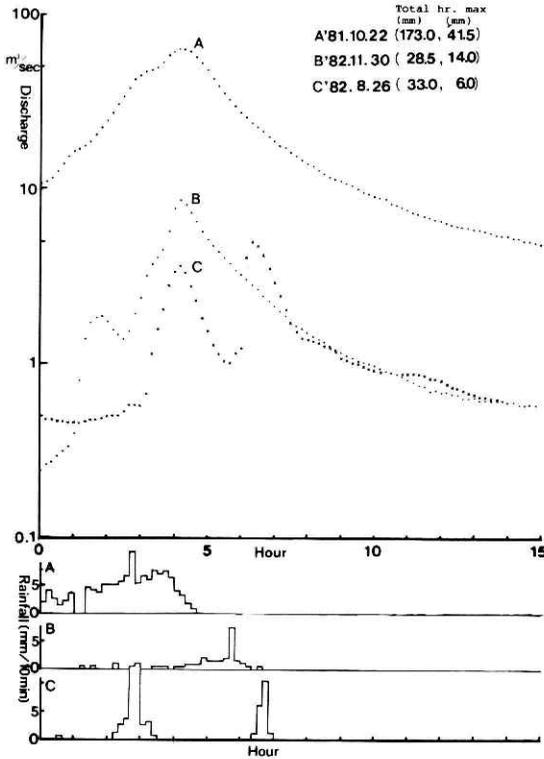


図14 降雨量の違いとハイドログラフ  
(筑波学園流出試験地)

Fig. 14 Observed hydrographs due to three different rainfalls  
(at Uenomuro in Tsukuba experimental basin)

の減少によるものである。

表面流出の発生域が不浸透域だけに限られる時に、不浸透域の増大に伴う有効雨量増加によって、低減係数は、不浸透面積率の増加とともに一定の関係を持って増える。

流域平均粗度の減少は、低減係数を大きくする。低減係数は、不浸透面積率0%と100%のものとの間で変化する。

- 2) 洪水流下速度の増大に伴うピーク流量増大の現象を実験的に再現した。
- 3) 不浸透面積率が同じ時、浸透域の土湿不足の違いによって低減係数は変化する。そして、低減係数の変化の仕方は、不浸透面積率によって次の様に異なる。
  - 浸透域の土湿不足が、大から小になると、
  - (a) 不浸透面積率が小さい時：低減係数は、土湿不足解消に伴う流出量の増加の影響を強くうけて低減係数は大きくなる。
  - (b) 不浸透面積率が大きい時：表面流出発生域の拡大による流域平均粗度増大の影響を強くうけて低減係数は減少する。

## 5. 問題点

この報告では、実験の概要を定性的に眺めたにすぎない。更に、現象を、浸透域からの流出を考慮しながら、詳しく解析することが必要とされる。同時に、大型の流域模型を用いた流出実験の評価を、浸透域からの流出を考慮した上で行う必要がある。

## 謝 辞

本実験を行うに当たり、大型降雨実験施設の運転については、施設課の方々にお世話になりました。特に青木秀夫氏には、複雑な降雨入力について、素晴らしい操作をしていただきました。降雨実験室そして災害研究会の方々には、常日頃研究活動を暖かく見守っていただきました。これらの方々の御協力により、ここに第一報をとりまとめることができました。心より感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 国立防災科学技術センター(1984): 大型降雨施設パンフレット。
- 2) 岸井徳雄ら(1984): 筑波学園流出試験地の流出特性(第二報)。国立防災科学技術センター, 研究報告33号, 23-68。
- 3) 岡本芳美(1982): 技術水文学。日刊工業新聞社。

(1986年12月22日 原稿受理)