

宅地域の雨水浸透と流出特性

岡 太郎・角屋 睦・野口 美具

RAINFALL INFILTRATION AND RUNOFF CHARACTERISTICS IN AN URBAN AREA

By *Taro OKA, Mutsumi KADOYA and Yoshitomo NOGUCHI*

Synopsis

The infiltration tests have been carried out at three field plots in an urban area by the equipment of artificial rainfall type developed by the authors for trial. The infiltration curves obtained by these field tests have been simulated numerically on the basis of the Richards equation by the method of trial and error for finding the hydraulic properties corresponding to the type of surface soil in a field plot.

Considering the result of this infiltration study, the runoff characteristics have been examined in the Kita-Ogurayama residential basin. The results obtained are as follows: The base flow is only composed of domestic sewage, and groundwater runoff from pervious area is negligible. Runoff from an impervious lot is almost 100 percent. Runoff from a pervious plot occurs only for rainfall over 20 mm in depth, and depends upon the moisture condition of surface soil. The effective rainfall intensity for runoff from the pervious plot is able to estimate by solving the Richards equation.

These results have been applied to the analysis of runoff from the Kita-Ogurayama residential basin. Runoff hydrographs simulated by the kinematic runoff model show good agreements with observed ones.

1. ま え が き

ここ数年の集中的な研究推進によって、都市化に伴う雨水流出特性変化の実用的予測が巨視的な意味で可能になりつつある¹⁾。しかし、都市住宅地域の流出過程は複雑であり、その細部については不明な点が多くない。また、都市化に伴う水害危険度の拡大防止を図るためには、都市化域の地目・地被要素別の雨水浸透・流出特性を明確にする必要があるが、これらについての知見は、まだほとんど得られていない。

本報告では、都市住宅地内で浸透能試験を実施して、雨水浸透能特性を攻究し、これらの成果を踏まえつつ、宇治市北御蔵山住宅団地流域について流出特性を吟味した結果、いくつかの興味ある知見を得ることができたのでその概要を述べる。

2. 浸透能試験装置と試験方法

浸透能試験法としては、いくつかの方法が提案されているが、ここではなるべく自然の状態に近い試験を行いたいと考え、Fig. 1 に示すような小型の試験装置を試作した。この試験装置は雨水供給部、降雨発生部、雨水浸透部及び計測記録部に大別できる。

雨水供給部は貯水タンク、循環ポンプ、定水頭タンク及び補助タンクよりなる。定水頭タンクには流量調

整用バルブ、補助タンクにはマノメータが取付けられており、流量制御と実験中の流量変化の監視が行えるようになっている。

降雨発生部は縦横の長さが 100 cm, 高さが 3 cm のジュラルミンと透明塩化ビニール製容器であり、底面に注射針状のノズルが 5 cm×5 cm 間隔に 400 本埋込まれている。ノズルの下部に金網が取付けられ、ノズルから落下した雨滴がこの金網に当って飛散し、一地点に雨滴が集中しないように工夫されている。なお、この降雨発生容器内は補助タンクの高さとの関係で負圧になり、水の供給が制御されるようになっているため、ほぼ 30 mm/hr 以上の均一な降雨が得られるよう工夫されているのが特長である。

雨水浸透部は試験区画である。これには縦(斜面方向) 100 cm, 横 90 cm の緩勾配の小区画を選ぶ。この小区画の周辺に、幅 10 cm, 長さ 1.2 m のアルミ板を深さ 5 cm 程度地中に埋設して、区画を囲み、表面流の区画外への流去を防ぐ。また区画の下流端に表面流集水装置を埋設する。なお、表面流集水装置や隔壁埋設時に生ずる間隙はパテ・粘土を用いて塞ぎ、漏水などの問題が生じないようにする。

計測記録部は、1 転倒が 100 cc の転倒マス型流量計、パルス—電圧変換器および電圧記録計よりなり、表面流出 100 cc ごとに発生するパルスが電氣的に記録されるようになっている。実験期間中の雨水供給量は一定に保たれているので、供給量から表面流出量を減算することにより浸透量が算出され、浸透能に換算される。なお雨量測定については、試験前後に全降雨量を集水・測定し、雨量強度に換算する方式を採用した。

試験方法としては、はじめ試験区画を塩化ビニール製波板で覆い、雨水供給量を所定の流量に調整する。計測記録部が完全に作動しているのを確認した後、試験区画を覆ってある波板を除去し、実験を開始する。降雨継続中は、補助タンクのマノメータにより雨水供給量の変化を監視するとともに、貯水タンクの水位を一定に保持するなど降雨強度の変化を生じないように十分注意を払う。実験終了時には、再び試験区画を波板で覆い、全降雨量を測定する。

3. 浸透能試験

3.1 試験区とその特性

1979年11, 12月に宇治市住宅地域の、Fig. 2 に示す 3 地点において浸透能試験を実施した。このうち、伊勢田試験区は、住宅地内に残存している畑地であって、ほとんど雑草でおおわれている。南陵試験区は児童公園内であって芝地である。また宇治野神試験区は宅地内の裸地である。

Table 1 に各試験区の土質特性などをまとめて示す。なお、南陵・宇治野神の両試験区では、樹木の根や礫が多く、土壌の単位体積重量の測定が困難であったので、間隙率は欠測となっている。しかし、いずれの試験区にも、山林域でみられ

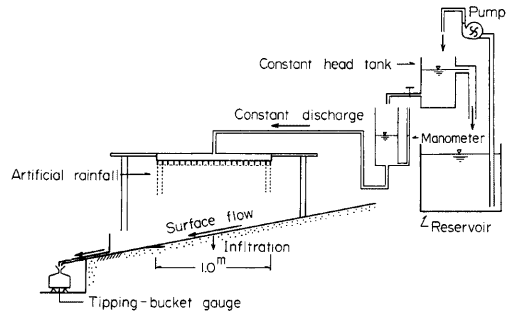


Fig. 1. Schematic illustration of the infiltration test equipment.

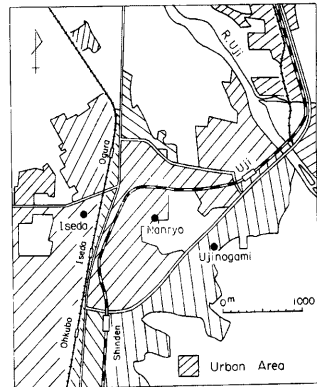


Fig. 2. Locations of infiltration test plots.

Table 1. Ground conditions of infiltration test plots.

Plot	Land classification	Land cover	Slope	Soil		
				Density	Porosity	Type
Iseda	Kitchen garden	Weed	0.156	2.48	0.486	Clay loam
Nanryo	Playing field	Lawn	0.297	2.53	—	Sandy clay loam
Ujinogami	House-lot	Bare	0.033	2.65	—	Clay with gravel

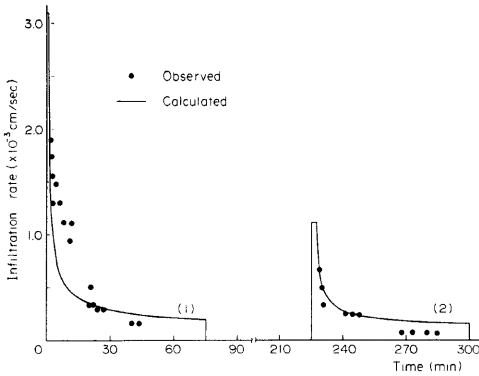


Fig. 3(a). Infiltration rates measured at the Iseda plot (kichengarden).

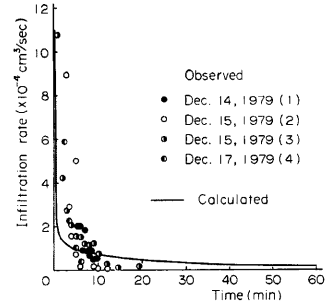


Fig. 3(c). Infiltration rates measured at the Ujinogami plot (house lot).

るような亀裂や粗大間隙はみられない。

3.2 浸透能試験の結果

各試験区で得られた代表的な浸透能曲線を Fig. 3(a)~(c) に示す。

Fig. 3(a) に示す伊勢田町畑地試験区の浸透能曲線は 102.6 mm/hr の降雨を 1 時間 15 分継続したのち、2 時間 30 分中断し、次に 35.1 mm/hr の降雨を 1 時間 15 分与えて得たものである。この実験に先立って体積含水率を測定したところ 0.312 であった。

Fig. 3(b) に示す南陵町児童公園の浸透能曲線は 43.8 mm/hr の降雨を 50 分継続したのち、1 時間 55 分中断し、次に 57.6 mm/hr の降雨を 35 分間与えて得たものである。この場合の初期含水比は 0.117 であった。

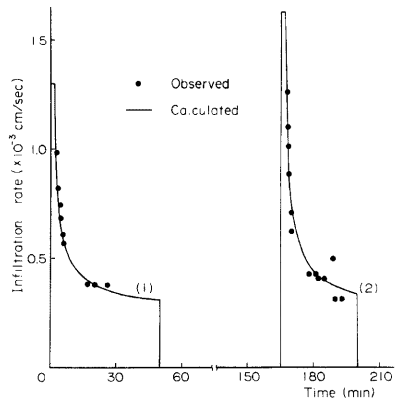


Fig. 3(b). Infiltration rates measured at the Nanryo plot (playing field).

Fig. 3(c) に示す宇治野神宅地の浸透能曲線は、40 mm/hr 前後の降雨を30分前後与えて試験を繰返して得たものであるが、本来の浸透能曲線が得られたかどうか疑問である。これは土質が礫混り粘土であって、浸透量が小さいこと、地表面勾配が1/30と小さい上に凹凸があり、雨水が地表面に貯留されがちであったためである。

以上のように、宇治野神の宅地の試験結果には問題があるが、他の2試験区では土質条件から予想される浸透能曲線が得られており、ほぼ満足できる結果が得られたと考えられる。

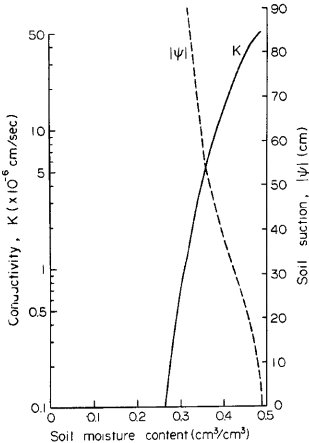


Fig. 4(a). Estimated unsaturated soil properties at the Iseda plot.

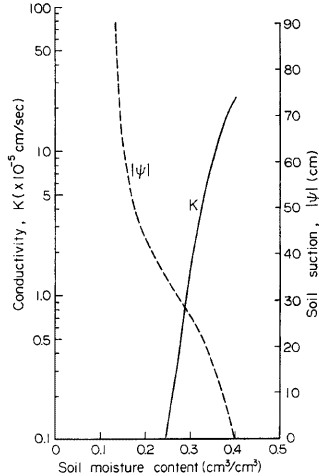


Fig. 4(b). Estimated unsaturated soil properties at the Nanryo plot.

3.3 浸透能曲線の数値シミュレーション

前述の浸透能試験結果の有用性の吟味と、住宅地の浸透能曲線についての一般的議論を行うため、不飽和浸透流の基礎式(1)を数値的に解析し、浸透能曲線の再現を試みる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \dots (1)$$

ここで、 θ : 体質含水率表示の土壌水分量、 $D(\theta)$: 土壌水分拡散係数、 $K(\theta)$: 不飽和透水係数、なお $D(\theta) = K(\theta) \partial \psi / \partial \theta$ の関係にある。 ψ : 圧力水頭、 z : 下向き正の鉛直座標、 t : 時間。

(1) 式の解析には、あらかじめ $K(\theta)$ 、 $\psi(\theta)$ を測定しておく必要があるが、ここではこれらの係数が得られていないので、浸透能曲線をうまく近似するように逐次修正を行い推定した。計算結果より得られた浸透能曲線を Fig. 3 (a)~(b) に併示してある。また最終的に用いた $K(\theta)$ 、 $\psi(\theta)$ を Fig. 4(a)~(c) に示す。なお実際の数値計算では、初期条件として、土壌水分量の実測値、これが得られない場合には推定値を与え、 z 方向の距離増分は、 $\Delta z = 1, 1$,

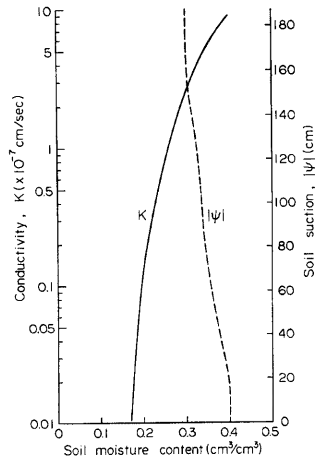


Fig. 4(c). Estimated unsaturated soil properties at the Ujinogami plot.

1, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 50 cm の不等間隔, 時間増分には $\Delta t=5 \text{ sec}$ を採用した。

Fig. 3(a)~(c) より, 計算で得られた浸透能曲線は実測値を良く再現しており, また最終的に用いた $K(\theta), \psi(\theta)$ も土質条件よりみて, まず妥当なものと判断される。

4. 北御蔵山住宅団地流域の流出解析

4.1 流域の概要

(1) 地形概況

北御蔵山流域の概略を Fig. 5 に示す。この流域は, 若干の茶畑が残ってはいるが, ほとんどが人工的に造成された丘陵宅地域であり, 水位計設置地点の流域面積は 0.17 km^2 である。流域は東西に細長く, 西向きに急傾斜して, その平均勾配はほぼ $1/10$ となっている。なお流域内に自然河川は存在せず, 雨水・下水はコンクリート排水路によって六地藏川に集められ, 山科川に排水される。

Fig. 6 にこの流域の幹線・支線排水路網を示すが, この流域はこれら幹線・支線排水路網によって12の支流域に分割される。Fig. 7 に代表的水路断面を示す。

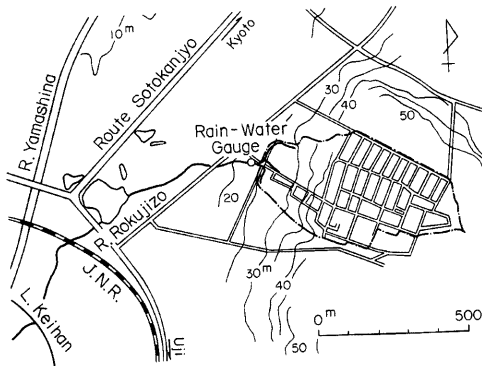


Fig. 5. Outline of the Kita-Ogurayama residential basin.

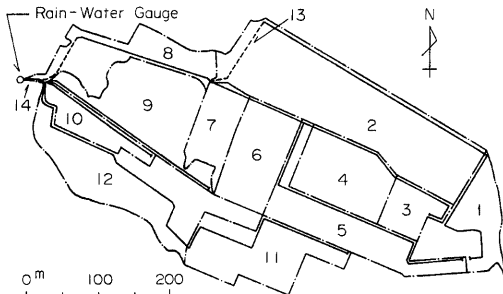


Fig. 6. Channel networks in the Kita-Ogurayama basin.

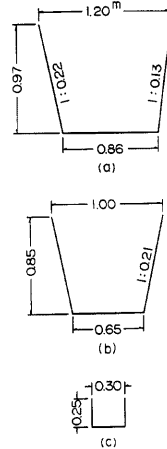


Fig. 7. Cross sections of channel in the Kita-Ogurayama basin.

(2) 地被別面積の計測

1979年5月に撮影された1/977のカラー空中写真を用いて, この流域を不浸透域と浸透域に区分してそれ

それぞれの面積を計測した。Fig. 8 に不透透域の分布を示す。

この流域には一部茶畑、竹ヤブ、裸地斜面が残っているが、大部分の浸透域は宅地内の浸透域であって全浸透域面積は 0.088 km^2 である。また不透透域は建物、ガレージ、舗装道路などであり、その面積は 0.082 km^2 である。Table 2 に支流域ごとに不透透域の面積を示してある。



Fig. 8. Distribution of impervious lots.

Table 2. Sub-basin and channel dimensions of the Kita-Ogurayama basin.

Sub-basin No.	Area, A (ha)	Impervious area, A_I (ha)	Pervious area, A_P (ha)	A_I/A	A_P/A	Slope of sub-basin		Slope of channel
						Right	Left	
1	1.53	0.36	1.17	0.23	0.77	0.038	0.046	0.038
2	3.54	2.41	1.13	0.68	0.32	—	0.038	0.045
3	0.53	0.37	0.16	0.70	0.30	—	0.051	0.034
4	1.19	0.64	0.55	0.54	0.46	—	0.078	0.047
5	1.45	0.70	0.75	0.48	0.52	—	0.025	0.028
6	1.08	0.66	0.42	0.61	0.39	—	0.054	0.060
7	0.77	0.40	0.37	0.52	0.48	—	0.015	0.060
8	1.12	0.64	0.48	0.57	0.43	0.083	0.044	0.036
9	1.64	0.25	1.39	0.15	0.85	0.050	—	0.096
10	0.55	0.41	0.14	0.75	0.25	—	0.031	0.096
11	1.45	0.69	0.76	0.48	0.52	—	0.060	0.061
12	2.20	0.70	1.50	0.32	0.68	0.059	0.121	0.030
13	—	—	—	—	—	—	0.030	0.030
14	—	—	—	—	—	—	0.030	0.030

(3) 水文観測資料

Fig. 8 に示されている地点で1964年以来水文観測が実施されている。ここに設置されている観測計器は 12 mm/hr 紙送りの 0.5 mm 転倒マス型雨量計と 15 mm/hr 紙送りの1/5縮率のフロート式水位計であり、とくに1976年以降水位計内に雨量計が組込まれ、水位・雨量が同一記録紙上に記録されるようになっている。

この水位計の下流に小規模の矩形堰が取付けられているが、強雨による大出水時には精度的に問題があるので、洪水観測結果をもとに堰公式、Manning 公式を適宜用いて流量推定を行った。

ここでは、1976年4月～11月の観測記録を雨量は10分間隔、水位は無降雨時には1時間、降雨量には10分間隔で読み取り、解析資料とした。Fig. 9 に1976年7月10日～19日の流量ハイドログラフを例示する。

4.2 下水流量の推定

Fig. 9 の低水部に着目すると、無降雨日の流量ヒドログラフに周期性が認められるが、この周期性は家庭の水道使用状況ときわめて良く一致している。またこの流域のすべての排水路はコンクリート製であり、地下水の浸出する可能性はほとんどない。これらより、無降雨日の流量ヒドログラフは家庭下水のみで構成されており、地下水流出成分は無視しうることが予想される。

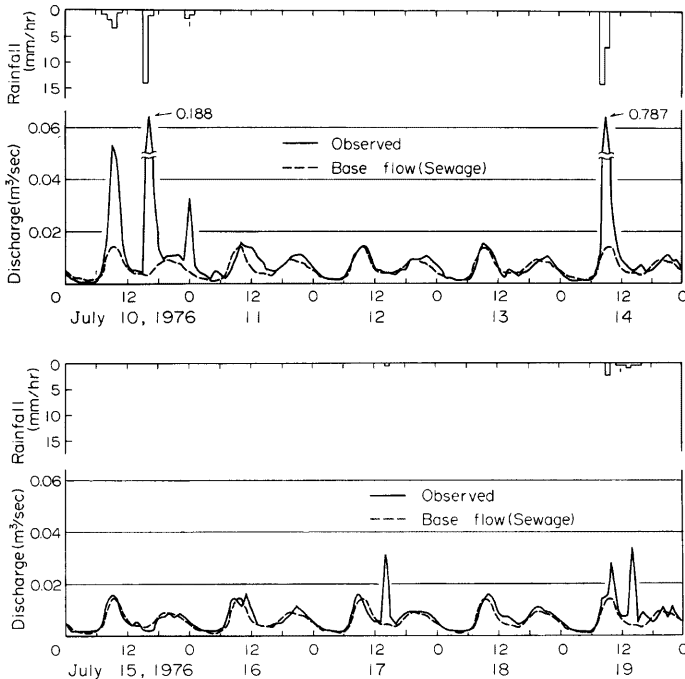


Fig. 9. Discharge hydrographs, July 10-19, 1976.

いま、1976年8月12～15日と8月18日～28日の15日間及び1976年10月29日～11月9日の12日間の無降雨日の観測ヒドログラフより毎時の平均流量を求めた結果を Fig. 10(a), (b) に示す。これらより日流出量を求めると、前者は $500.4 \text{ m}^3/\text{day}$ 、後者は $417.6 \text{ m}^3/\text{day}$ となる。この流域の住宅数は500戸であり、4人/戸と仮定して1人当りの下水放流量を算出すること、前者で $0.250 \text{ m}^3/\text{day}$ 、後者で $0.209 \text{ m}^3/\text{day}$ となる。これらの数値は水道計画に用いられる数値²⁾と対比すると、決して不思議な値ではないので、結局無降雨日の流出量は家庭下水のみによって構成されていると結論してよさそうである。ただ Fig. 10(a) と (b) に若干の差異はあるが、これは季節的なものと理解できよう。

Fig. 9 にこのようにして得た下水流量を併示してあるが、観測ヒドログラフの低水部をかなり良く近似している。

4.3 雨水流出概況

ここでは、1976～1979年の流出ヒドログラフを用いて次のような水収支計算を行うとともに流出量ヒドログラフより巨視的な流出特性を検討した。

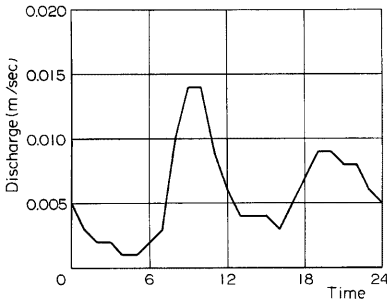


Fig. 10(a). Average of base flow hydrographs, August 12-15 and 18-28, 1976.

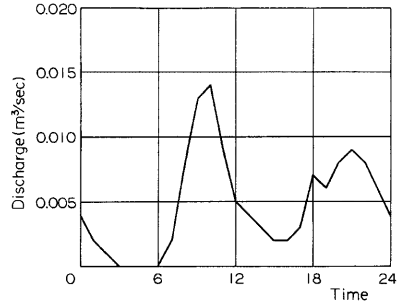


Fig. 10(b). Average of base flow hydrographs, October 29-November 9, 1976.

まず、下水流出成分を除去した流量ハイドログラフより一降雨の総流出量を求める。次にこの流出量が不浸透域のみからの流出であると仮定し、不浸透域の流出高に換算する。この流出高が降雨量以上の値を示した場合には不浸透域からは全降雨量が流出し、残部が浸透域からの流出量とみなし、流出高に換算する。

Fig. 11 には、このようにして得た降雨量と流出高との関係を不浸透域と浸透域別に示す。Fig. 11 (a) に着目すると、不浸透域からは雨量が少ない場合でもほとんど100%流出し、不浸透域での損失は2~3mmが限度であることがわかる。Fig. 11(b) からは、1降雨量が20mm以下の場合には浸透域からの流出は生起せず、20mm以上の場合でも降雨や土壌水分条件によっては流出が生起しない場合があることがわかる。

Fig. 12 に不浸透域のみから、Figs. 13~15 には不浸透域・浸透域の両方から流出が認められたときの流出量ハイドログラフとそのときのハイトグラフを示す。Table 3 にそれらの流出高をまとめて示す。また、浸透域からの流出高に対応する平均的浸透能を ϕ -index 法で求め併示してある。

これらより、北御蔵山流域の雨水流出概況をまとめると次のようである。

- (i) 不浸透域からはほとんど全雨量が流出し、不浸透域での雨水保留・損失量は無視しうる。
- (ii) 浸透域からの流出は降雨量が20mm以上の場合に限られるが、その量は総雨量とあまり関係がなく、土壌水分量や降雨強度と関連が強いようである。
- (iii) 流量ハイドログラフは降雨波形に敏感である。したがって、下水成分を除去した降雨時の流量ハイドログラフは表面流出成分のみで構成されているものと予想される。

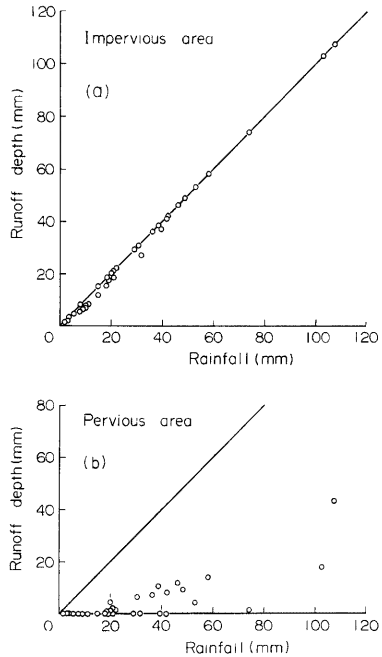


Fig. 11. Rainfall vs. runoff depth.

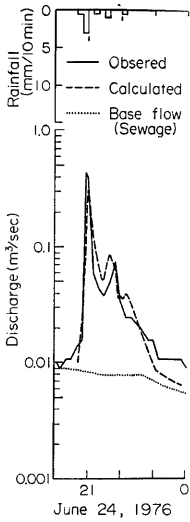


Fig. 12. Comparison of calculated and observed discharge hydrographs, June 24, 1976.

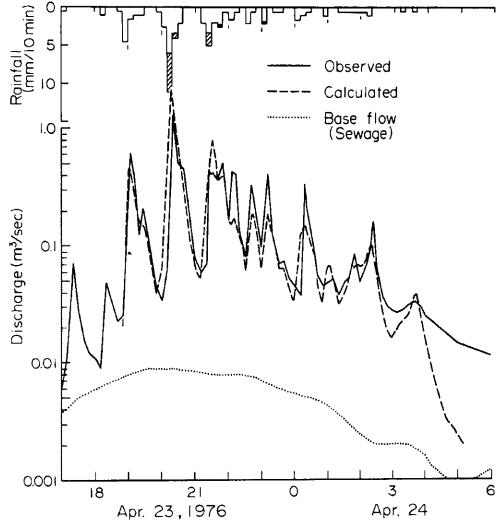


Fig. 13. Comparison of calculated and observed discharge hydrographs, April 23-24, 1976.

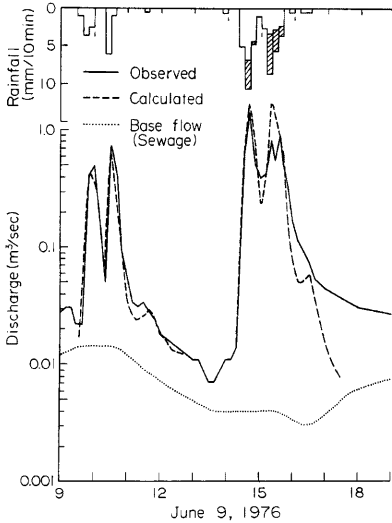


Fig. 14. Comparison of calculated and observed discharge hydrographs, June 9, 1976.

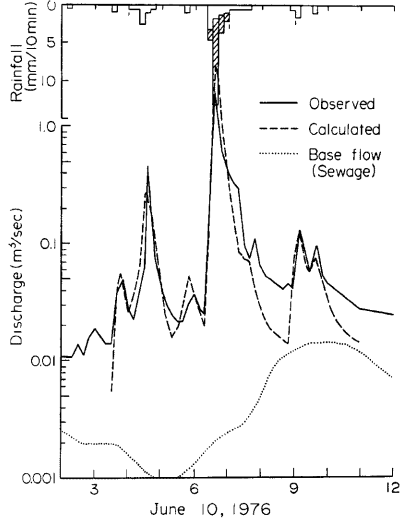


Fig. 15. Comparison of calculated and observed discharge hydrographs, June 10, 1976.

Table 3. Summary of observed and calculated runoff depth.

Date	Rainfall (mm)	Runoff volume (m ³)	Runoff depth from impervious area (mm)	Runoff depth from pervious area		Mean infiltration rate obtained Φ -index method (mm/hr)
				Observed (mm)	Calculated (mm)	
April 23~24, 1976	58.0	5980	58.0	13.7	7.9	2.5
June 9, 1976	64.0	6252	64.0	11.2	13.0	4.5
June 10, 1976	35.5	4028	35.5	12.6	16.0	3.0
June 24, 1976	5.5	461	5.5	—	—	—

(iv) 平均的浸透能は 2.5~4.5 mm/hr(0.00042~0.00075 cm/sec) であり, 前述の伊勢田町畑地試験区の浸透能に類似している。

4.4 浸透域よりの流出成分の算出

Figs. 13~15 の降雨条件のもとに不飽和浸透流の基礎式を数値的に解析し, 降雨を浸透成分と非浸透成分(流出成分)に分離する。この場合, $K(\theta), \psi(\theta)$ を既知とする必要があるが, ここでは表面流出量が一致するように逐次修正を行い推定した。なお, 前述の平均的浸透能を参考にして, これらの係数の第 0 近似を定めることにより試算回数を減らすことができるが, この計算では, 北御蔵山流域の平均的浸透能が伊勢田町畑地のものと類似したので, Fig. 4(a) の $K(\theta), \psi(\theta)$ を第 0 近似として用いた。

4 回の試算の後, 最終的に用いた係数を Fig. 16 に示す。なお実際の数値計算では, 初期条件として地表付近の土壤水分量を 0.15 と仮定し, 他の計算条件は 3.3 で採用したものと同一とした。

各降雨について得られた流出成分(非浸透成分)を各ハイトグラフと Table 3 に併示してある。Table 3 より, 浸透域の流出高について実測値と計算値を比較すると, 6 月 9 日の降雨については良く一致しているが, 4 月 23 日の降雨では計算値が過小, 6 月 10 日の降雨では過大になっている。このように個々の降雨については若干の差が認められるが, これらの誤差は正負まちまちであり, 他の計算結果を加えて総合的に判断すると計算結果は観測値をかなり良く再現しているといえる。

4.5 表面流出の解析

これまでの検討結果より, 北御蔵山流域の雨水流出は表面流出が主体であると考えられる。そこでここでは kinematic runoff model を用いて雨水追跡計算を行い, 観測地点の流量を算出する。

(1) kinematic runoff model³⁾

このモデルでは, 表面流を kinematic wave 的に流下するとみなしている。この場合の基礎式は次式である。

$$\text{斜面: } h_s = kq^p \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{流路: } A_0 = KQ^P \quad \dots\dots\dots (4)$$

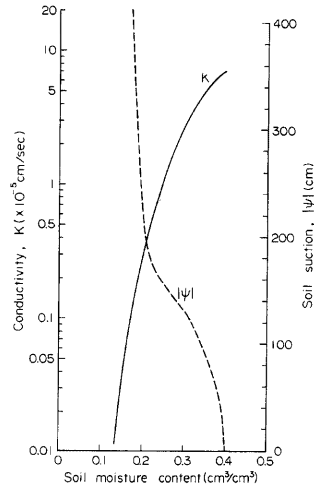


Fig. 16. Estimated unsaturated soil properties of Kita-Ogurayama basin.

$$\frac{\partial A_0}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 h_s : 斜面上の水深、 q : 単位幅流量、 r_e : 有効雨量強度、 A_0 : 流水断面積、 Q : 流量、 t : 時間、 x : 距離、 k, p : 斜面定数で Manning 則が成立するとして、 $p=0.6, k=(N/\sqrt{I})^3, I$: 斜面勾配、 N : 等価粗度、 K, P : 流路定数。

実際の計算では上述基礎式を特性曲線法を用いて解く。

(2) 流域のモデル化

kinematic runoff model を用いて流出解析を行う場合流域のモデル化が必要であるが、ここでは Fig. 6 を考慮して Fig. 17 の流域モデルを作成した。なお Table 2 に各ブロックの斜面勾配と河道勾配を併示してある。

等価粗度 N は、試算により $N=0.03$ を最適値と判断した。また排水路の粗度係数 n は、 $n=0.01$ とした。

(3) 有効雨量

不浸透域からは全降雨が、浸透域からは不飽和浸透流解析で得られた非浸透成分が流出するものとし、各支流流域の有効雨量は (6) 式を用いて算出した。

$$R_E = R_I \frac{A_I}{A} + R_P \frac{A_P}{A} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 R_E : 各支流流域の有効雨量、 R_I : 不浸透域の有効雨量 (= 観測雨量)、 R_P : 浸透域の非浸透量、 A, A_I, A_P : それぞれ、支流流域の面積、不浸透域面積、浸透域面積。

(4) 計算結果

Fig. 12 及び Fig. 14 の前半に不浸透域のみから雨水流出が認められる場合の計算結果を示す。

Figs. 13~15 に不浸透域と浸透域の両方から流出がある場合の計算結果を示す。

これらの図より計算結果は観測ハイドログラフをかなり近似しており、ここで採用した各種近似やモデルはほぼ妥当なものと思われる。

しかし、各ハイドログラフを詳細に検討すると、計算結果は降雨初期に過大、後期には過小の傾向にあり、改良の余地があることに気付く。また計算では流出量は降雨終了後急激に減少するが、実測結果では流量が約 $0.050\text{m}^3/\text{sec}$ 以下になると低減が緩くなる。この差は流出高になおすとそれほど大きくなく、観測精度上の問題もあるため詳細な検討を省略するが、若干の中間流的な流出成分の存在も予想される。

5. あとがき

本報告では、宇治市住宅地域内の 3 個所で浸透能試験を行うとともに、北御蔵山住宅団地流域について流出解析を行い、都市住宅地域の雨水流出過程について基礎的な検討を加えたが、その結果の主な点をまとめると次のようである。

(i) 住宅地域の浸透能曲線は、土質条件によって決まり不飽和浸透流理論を適用してかなり良く近似することができる。なお丘陵自然林地で見られるような粗大間隙への雨水の浸入⁴⁾は無視しうる。

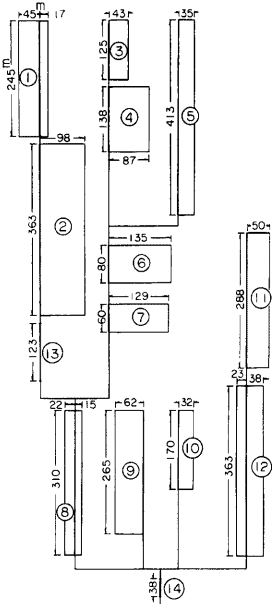


Fig. 17. Model of the Kita-Ogurayama basin.

(ii) 不浸透域からはほとんど全雨量が流出するが、浸透域では降雨・土壌水分条件が整わないと表面流出は生起しない。

(iii) 都市住宅地域の雨水流出過程を、浸透域の雨水浸透過程及び浸透域非浸透成分と不浸透域全降雨の表面流下過程に分けて考えることができそうである。またそれぞれには、不飽和浸透流理論、kinematic runoff model の適用が有用である。

(iv) 一方、不飽和浸透流の基礎式を解析する場合、計算に用いる係数を試算で推定したが、計算コストの点で問題がある。これについては、物理現象を損わない程度の流出過程の単純化・モデル化が必要である。また不飽和浸透流理論における諸係数の現地測定法の提示が強く望まれる。

本報告は、昭和54年度、文部省科学研究費自然災害特別研定(2)による研究成果の一部である。なお資料の整理解析には京都市大学防災研究所防災科学資料センターの FACOM M-140、化学研究所の FACOM M-160-AD 及び大型計算機センターの FACOM M-200 を使用した。

参 考 文 献

- 1) 例えば、角屋 睦：都市化と流出，水工学シリーズ，74-A-2，土木学会水理委員会，1974。
- 2) 例えば、加藤 晃・河上省吾：都市計画概論，大学講座土木工学21，共立出版株式会社，1977，p. 197。
- 3) 例えば、角屋 睦・岡 太郎：市街地域の雨水流出特性，京都大学防災研究所年報，第14号 B，1971，pp. 143-155。
- 4) 岡 太郎・角屋 睦：丘陵地斜面域における雨水の浸入・流出過程，京都大学防災研究所年報，第18号 B，1975，pp. 469-482。