

大阪大学工学部 正員 室田 明

神戸大学工学部 正員 ○神田 徹

大阪大学大学院 学生員 佐橋義仁

1. まえがき

本研究は、山腹斜面における中間流出の機構に関して模型実験によって考察したものである。中間流出には雨水の浸透に始まり、地表面下における水理現象の伝播、変形等の複雑な機構が内在するためその内部機構の解明とともに、モデル化にもいくつかの課題が残されている。中間流出に関する手法としては、非等方性を考慮し、飽和浸透流、不飽和浸透流の混在した地表面下の流れを浸透流一般の問題として微視的に解析する手法があるが、一方、山腹表層を中間流出の生起場として、モデル化された浸透流に関する理論的研究がなされている。

本研究は、種々の降雨、流域条件に対する山腹表層内の流れを模型実験で再現することによって、中間流出機構を検討し、さらに、一次元浸透流の立場から中間流出をモデル化する場合に、これらの成果を導入することを試みたものである。まず、ハイドログラフ低減部の特性が、基礎方程式の各項の値の変化と密接な関係があることを実験的に確認した後、基礎方程式に不飽和鉛直浸透を導入し、表層内を一体とした流出過程を検討した。最後に貯留関数法の定数と中間流出の機構との関連性についても考察を加えた。

2. 実験装置および方法

降雨発生装置は、高水槽から雨水パイプに給水し千鳥状に分布するノズルから水を噴出して降雨をシミュレートする。流域モデルは、長さ 4m、幅 0.2m、高さ 0.5m の透明塩化ビニールの容器に砂を敷きつめたものである。砂層は底面に平行に積み、流域有効長は 340cm である。流域構成砂は、粒径 $d_{50} = 0.64\text{mm}$ ($d_{10} = 0.32\text{mm}$)、透水係数 $k = 0.26\text{cm/sec}$ の粗砂である。流出量は流域下流端で測定し、斜面に沿う飽和水深をマンオメーターで測定した。

本実験で採用した降雨、流域条件は以下の通りである。

降雨条件：

降雨域；上流域 180cm，流域全域 340cm

降雨強度； $r_e = 50\text{mm/hr} \sim 200\text{mm/hr}$

降雨継続時間； $T_{re} = 30\text{min} \sim 100\text{min}$

流域条件：

砂層厚； $D = 15, 20, 25, 30, 35, 40\text{cm}$

底面勾配； $\sin\theta = 0.1, 0.1125, 0.125, 0.15, 0.175$

上記の条件においては、流域上への降雨はすべて流域内に浸透し、底面に沿って飽和水深を形成して流れた。

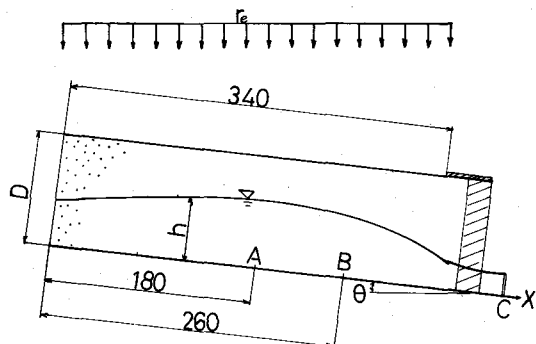


図-1 流域モデル概略図

3. ハイドログラフの諸特性

3-1. ハイドログラフ低減部

ハイドログラフ低減曲線の特性について述べる。降雨遮断後の下流端流量～時間曲線は、図-2のごとく片対数紙上では2～3個の折曲点を持ち、勾配の異なる折線近似が可能である。一つの直線で近似できる各領域（Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ）は流出機構を異にすると考えられ、その考察は

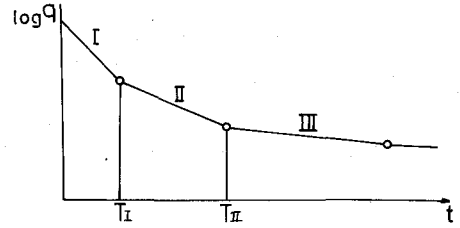


図-2 ハイドログラフ低減曲線

以下の章で行なう。図-3(a), (b), (c)は低減係数と降雨，流域条件との関係を示すものである。ただし，図-3の低減係数は図-2の領域-Ⅲのものである。勾配が大で，降雨強度が小さい場合には領域-Ⅰがあらわれない。また，降雨域を流域上流側のみとした場合，飽和水深を用いて計算されたハイドログラフ低減曲線は折曲点で，A，B，C点（図-1参照）でそれぞれ1，2，3個であった。このことは中間流出機構が場所によって異なることを示す。ただし，以下の考察にあたっては，C点の流量とB点の水深を対応させている。

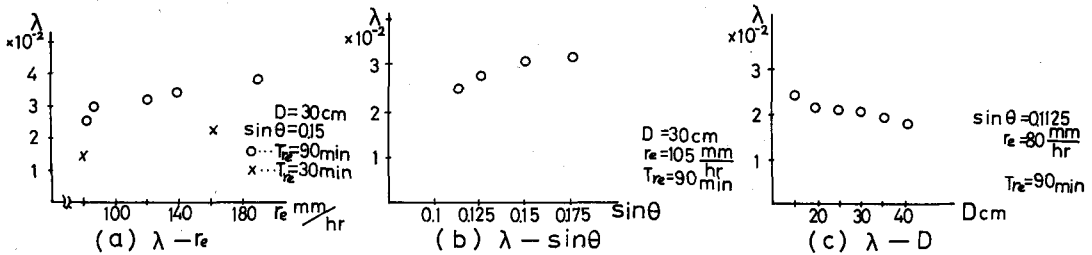


図-3 低減係数の変化

3-2. 到達時間

降雨強度を変化させた場合，下流端流量および飽和水深が定常状態になるまでの時間を検討するために，図-4のごとく降雨強度を段階的に変化させた。 $c = k \cdot \sin \theta / \gamma$ （ γ ：有効空隙率， L ：流域長 x_0 ；上流端から表面流生起点までの距離）とすれば，中間流のみの場合は時間 $t_{c1} = L/c$ ，表面流が生起する場合は $t_{c2} = x/c$ で下流端流量が定常になることが確認された（図-4-A部参照）。しかし飽和水深は下流端流量が定常になった後も若干上昇を続け，その間の水深変化は $q = k \cdot h(\sin \theta - \partial h / \partial x) = \text{const}$ を満足する。この現象のために，表面流の生起点は上流側へ若干移動する。ハイドログラフ低減部（B部）では，下流端流量，飽和水深共にほぼ同時刻 t_a で定常になり $t_{c2} < 1/2 t_{c1}$ であった。このことは立上り部と低減部の機構の相異を顕著に示すものであると考えられる。

図-5は，降雨強度および降雨継続時間を変化させて，降雨を遮断した後の下流端流量の変化を比較したものである。下流端流量が定常に達している場合には降雨遮断とともに低減を開始するが，定常に達していない場合には q_{max} の生起時刻 t_r は強雨強度，降雨継続時間の減少とともに遅れる。すなわち，水深の増大とともに水理現象の伝播が速くなることを示している。

また，降雨域を上流域のみとして定常状態から降雨を遮断した場合，1～2min以内で下流端流量が低減を開始するが，この伝播の速さは不飽和層から飽和層への水供給が降雨遮断と同時に停止すること，および飽和浸透流の拡散効果によるものと考えられる。

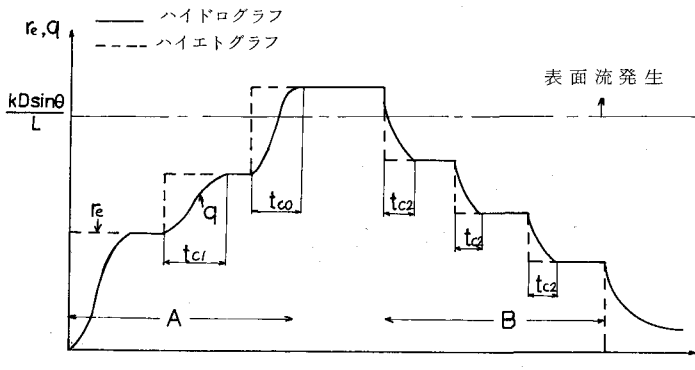


図-4 ハイエットグラフ (r_e), ハイドログラフ (q)

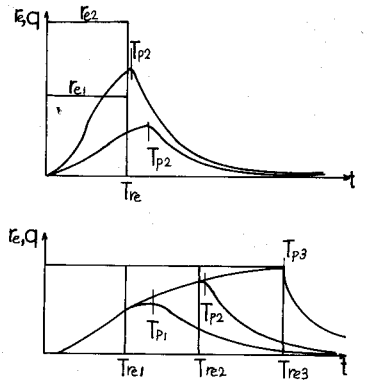


図-5 到達時間

4. 中間流出機構の考察

4-1. 基礎方程式各項の比較

一次元浸透流の基礎方程式は微少項を省略すれば、

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \gamma \frac{\partial h}{\partial t} = k(\sin\theta \frac{\partial h}{\partial x} - h \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}) + \gamma \frac{\partial h}{\partial t} = f \quad (1)$$

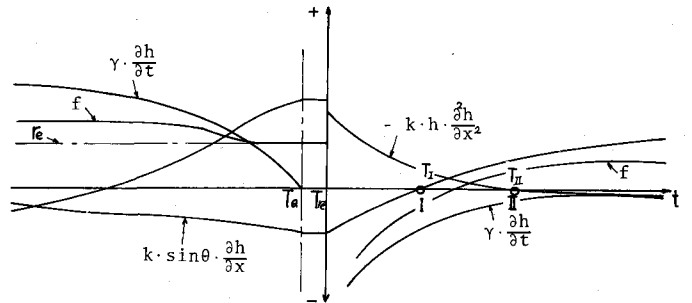


図-6 基礎方程式各項の比較 (B点)

である。第2式の左辺第3項は水深

の時間的変化の項、第1項は輸送項、第2項は拡散項、右辺は飽和浸透流への不飽和層からの水供給項である。

本実験のような一層モデルにおいて、ハイドログラフ低減曲線に数個の折曲点が生起することに注目し、この折曲点が浸透流の物理機構の変化に関係するものと考えて、基礎方程式の各項について検討した。図-6は、B点において基礎方程式の各項を比較したものである。 $\gamma \cdot \partial h / \partial t$ はハイドログラフ立上り部で常に正、低減部では常に負である。 $k \cdot \sin\theta \cdot \partial h / \partial x$ は降雨遮断後しばらくは負であるが、水面が水平に近づくとともに正の値をとるようになり、以後増大する。 $-k \cdot h \cdot \partial^2 h / \partial x^2$ は降雨遮断後しばらくは正であるが、減少して0または負の値をとるようになる。 f は上記3項の値を基礎方程式に代入して計算したものである。

以上の各項を比較した結果、前述の折曲点生起時刻に卓越成分が拡散項 ($-k \cdot h \cdot \partial^2 h / \partial x^2$) から輸送項 ($k \cdot \sin\theta \cdot \partial h / \partial x$) に変わることがわかった。図-6において T_I における水理量の遷移特性を性質Ⅰとし、 T_{II} における水理量の遷移特性を性質Ⅱとすれば、各時間帯における基礎方程式の卓越項を用いて次のように近似することができる。

$$T_{re} < t < T_I ; \quad \frac{\partial q}{\partial x} = -k \cdot h \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} , \quad T_I < t ; \quad \frac{\partial q}{\partial x} = k \cdot \sin\theta \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2)$$

この T_I , T_{II} は前述の折曲点生起時刻と対応する。したがって各直線部は拡散項あるいは輸送項が卓越する流れであることがわかる。計算結果によれば、A点では拡散項が小さいので輸送項が卓越し、

生起する唯一の折曲点は図-6のⅡの性質を持つ。B点で生起する2個の折曲点はそれぞれⅠ,Ⅱの性質を持つ。また下流端ハイドログラフ低減曲線に生ずる第3の折曲点以降は不飽和成分が支配的である。図-6のような各項の値の遷移は、本実験範囲では底面勾配が0.1~0.125で降雨強度が80mm/hr~125mm/hrの場合である。

下流端条件、降雨、流域条件を変えると、水面の曲率($\partial^2 h / \partial x^2$)が敏感に変化して、それによって各項の値の変遷も異なるが、一般的な傾向は図-6に示すごとくである。図-7は低減部のfの値の時間的変化を降雨、流域条件と比較したものである。

降雨遮断後も層内に保水された雨水は、飽和浸透流への水供給源であり、また飽和浸透流消滅後は不飽和流出成分として長期流出の主体となる。図-6から明らかなように、fは降雨継続中はほぼ一定値を取り、定常状態に近づくとき $f_{min} = r_e$ となる。降雨遮断後しばらくは飽和水面付近の不飽和鉛直浸透流速より $|\partial h / \partial t|$ が大きいので $f < 0$ となり、層内に不飽和保水量が増えることになる。やがて $|\partial h / \partial t|$ が減少し、飽和水面付近の不飽和鉛直浸透流速と一致した時、 $f = 0$ となり、以後 $|\partial h / \partial t|$ の減少とともにfは増大する。fの値は条件によって複雑に変化するので、中間流出機構を一次元的にモデル化する場合には、飽和水面を経由する流出・流入量すなわちfを正確に推定することがきわめて重要である。

4-2. 不飽和浸透流を導入したモデルの提示

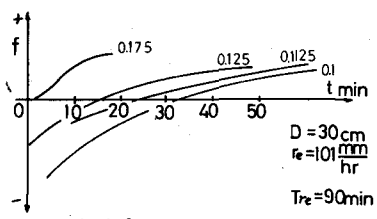
飽和水深の上昇および下降における水面付近の機構をそれぞれ図-8(a),(b)のごとくモデル化し、基礎方程式を次のごとく書き直す。

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \gamma_e \frac{\partial h}{\partial t} = f_0, \quad f_0 = w_a = w_b \cdot \gamma = w_c \cdot n \cdot \gamma \quad \text{---(3)}$$

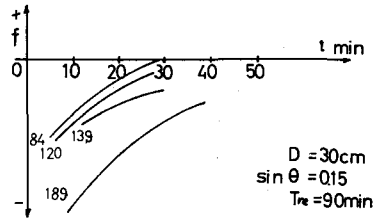
ここに、

- γ ; 有効空隙率
- γ_e ; 有効空隙から不飽和鉛直浸透部分(含水量)の体積を除いた体積の全体積に対する割合
- w_a ; 全断面積平均の不飽和鉛直浸透流速(見かけの流速)
- w_b ; 有効空隙平均の不飽和鉛直浸透流速
- w_c ; 不飽和鉛直浸透実流速
- n ; 飽和度

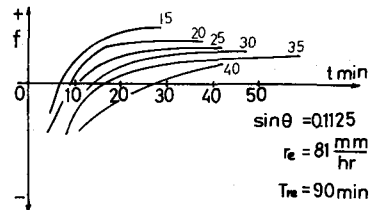
図-8(a)は一定降雨量 r_e の継続中に水面が $h = h_1$ から $h = h_2$ に上昇する過程を示す。不飽和層の



(a) $f - \sin \theta$



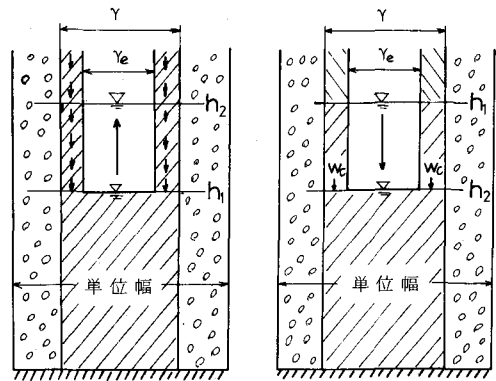
(b) $f - r_e$ (mm/hr)



(c) $f - D$ (cm)

図-7

低減部のfの時間的変化



(a) 上昇時

(b) 下降時

図-8 飽和水面の昇降モデル

効空隙 (γ) 内の含水率 $n \cdot \gamma$ は $n \cdot \gamma = r_e / w_c$ であるから、 $\gamma_e = \gamma - r_e / w_c$ となり、また $f_0 = r_e$ である。
したがってこのモデルに対する基礎方程式は次式のごとくである。

$$\frac{\partial q}{\partial x} + (\gamma - \frac{r_e}{w_c}) \frac{\partial h}{\partial t} = r_e \quad \text{---(4)}$$

降雨遮断後飽和水深が、 $h = h_1$ から $h = h_2$ に降下する場合の水面付近の機構を図-8 (b) に示す。
この時の含水率 $n \cdot \gamma$ は、水面降下部分に残される不飽和流出成分であると考え、 $\gamma_e = \gamma(1-n)$
また $f_0 = w_c \cdot n \cdot \gamma$ となるから基礎方程式は次のごとくになる。

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \gamma(1-n) \frac{\partial h}{\partial t} = w_c \cdot n \cdot \gamma \quad \text{---(5)}$$

図-6および図-7に示す f は飽和水面への実質的な流入・流出水量であり、上2式と対応させる
と立上り部で $f = r_e (1 + (\partial h / \partial t) / w_c)$, 低減部で $f = n \cdot \gamma (w_c + \partial h / \partial t)$ である。

上記の式中に用いた w_c は、飽和水面の上層にできる毛管帯内の鉛直浸透流の実流速であるが、ハイドログラフの立上りの遅れ時間 T_d を用いると $w_c = D / T_d = 1.5 \text{ cm/min}$, 底部に飽和水面を持たない場合の実験からも $w_c = 1.5 \text{ cm/min}$ であった。図-6および図-7における $f = 0$ の時刻の水面低下速度は $0.1 \sim 0.3 \text{ cm/min}$ であり、これらのことから飽和水面付近の w_c はその上層の平均速度の $1/10$ 程度と想像される。

5. 貯留関数法について

5-1. モデル実験における貯留関数の適用性

実際流域では流出機構をブラック・ボックス的にモデル化し、モデル定数を実測資料から定める方法が用いられることが多い。しかし、これらのモデル化はその実用性はさることながら、本質的に現象の物理的説明を考慮する立場ではない。ここでは模型実験によって流出機構が比較的明らかにされている流域モデルに貯留関数の形式を適用し、諸定数が流出機構といかなる関連を持っているかを実験的に示すことによって、いわゆる貯留関数法の適用性に関する若干の検討を行った。

実験の結果、 s (保水量) $\sim q$ は緩勾配、弱降雨強度の場合には線形な関係で近似でき、一価関数となった (図-9 (a) 参照)。急勾配になると、 $s \sim q$ 曲線は一価関数からはずれ、降雨強度を増大させると流量のピーク付近で別の直線に乗る (図-9 (b) 参照)。また、これらの $s \sim q$ 曲線を両対数紙上にプロットすると、これも直線となり、 $p \neq 1$ であった。遅れ時間には降雨開始時からハイドログラフが立上るまでの時間 T_d を使用した。

表-1 は底面勾配を変化させた場合の $S = K' q$ および

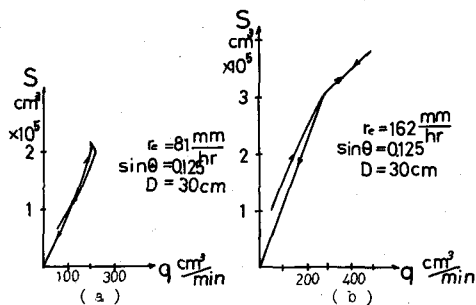


図-9 $s \sim q$ 曲線

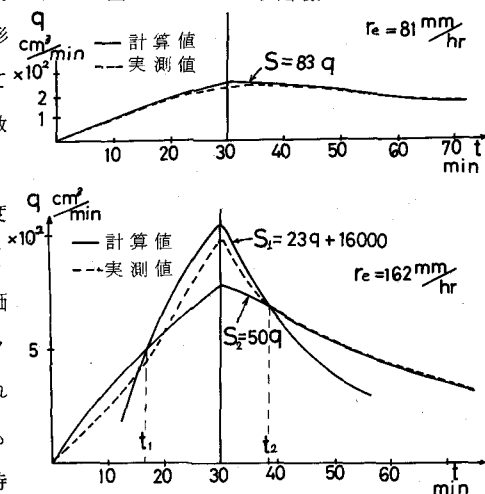


図-10 計算より求めたバイドログラフと
実測値の比較

$r_e = 81\text{mm/hr}$ (D = 30cm)			$r_e = 162\text{mm/hr}$ (D = 30cm)			
$\sin\theta$	$S = K'q + C$	$S = K q^p$	$S_1 = K'q + C$	$S_2 = K'q + C$	$S_1 = K q^p$	$S_2 = K q^p$
0.1	$S = 90 q + 6000$	$S = 555 q^{0.7}$	$S_1 = 23 q + 17000$	$S_2 = 50 q + 5600$	$S_1 = 600 q^{0.63}$	$S_2 = 266 q^{0.76}$
0.125	$S = 83 q$	$S = 50 q^{0.98}$	$S_1 = 23 q + 16000$	$S_2 = 50 q$	$S_1 = 620 q^{0.6}$	$S_2 = 19 q^{1.4}$
0.15	$S = 62 q - 5400$	$S = 9 q^{1.3}$		$S_2 = 42 q - 7000$	$S_1 = 1.26 q^{1.5}$	$S_2 = 0.06 q^{2.0}$

表 - 1 $S \sim q$ 関係

$S = K \cdot q^p$ を示したものである。 $r_e = 162\text{mm/hr}$ において S_1 はピーク付近、 S_2 は低減部の保水量である。

図 - 10 は、 $S \sim q$ 関係 ($p = 1$) より求めた K' を用いて描いたハイドログラフと実測値を比較したものである。

5 - 2. 定数 K について

本実験で得られた $S \sim q$ 関係に線形貯留型 ($p = 1$) を仮定し、定数 K の変化と中間流出機構の変化の関連性を検討した。図 - 10 で、 $t_1 > t_2$, $t_2 < t$ においては輸送項が卓越し、 $t_1 < t < t_2$ においては拡散項が卓越しており、 $t = t_2$ がハイドログラフ低減曲線の折曲点生起時刻 t_2 とほぼ一致することから、 $t = t_2$ における遷移特性は性質 I であることがわかる。また降雨、流域条件の変化と K の値の変化を比較すると、底面勾配、降雨強度と K の値は負の相関を示し、砂層厚とは正の相関を示した。低減係数 λ と貯留関数法の定数 K とが、各条件に対して逆の相関性を持つことは、 $\lambda \sim \partial q / \partial t =$

$(1/K) \partial S / \partial t$ からも明らかである。

6. 結論

本実験によって得られた成果を要約すると次の通りである。

- 1) 中間流出は、水深と水面曲率の積が卓越する場合と、動水勾配が支配的である場合とによって流出機構を異にし、その遷移点がハイドログラフ低減曲線および $S \sim q$ 曲線の折曲点としてあらわれる。
- 2) 中間流出を一次元モデルであらわす場合には、その過程は2つのサブシステムすなわち、 (1) 降雨 $\rightarrow$ (鉛直浸透流) $\rightarrow$ 飽和浸透流、 (2) 飽和浸透流 $\rightarrow$ (伝播) $\rightarrow$ 流出、によって構成される。前者に関してハイドログラフ立上り部と低減部について、不飽和層から飽和層への流入・流出水量 f を導入した基礎方程式を提示した。また、定常状態になった後、降雨遮断とともに飽和水面への供給が停止する ($f < 0$) ことが、前者の伝達特性である。後者については、基礎方程式の各項から推定できることを確認した。
- 3) 貯留関数法の形式を導入することで保水量の立場から中間流出機構を検討でき、また定数 K と低減係数 λ とが密接な関係にあることを実験的に確認した。

終りに、本研究は文部省科学研究費の援助を受けた。記して謝意を表する。

参考文献；

- 1) Freeze, R. A. ; Three-Dimensional, Transient, Saturated-Unsaturated Flow in a Groundwater Basin, Water Resources Research, Vol. 7, No. 2., 1971.
- 2) 高棹琢馬；流出系モデルとその解析, 1971 年度水工学に関する夏期研修会講義集, 1971.
- 3) 室田明・神田徹・佐橋義仁；降雨シミュレーターを用いた流出の基礎的実験 (第 1, 2, 3 報) 土木学会年次学術講演会講演概要集, 1972, 1973.