

## 短 報

## 一次元鉛直不飽和浸透を用いた雨水流出特性の検討 (III)

## 斜面流出モデルの三紀層斜面への適用結果\*

太田 岳史\*\*・阿部 実\*\*

## I. はじめに

山腹斜面が雨水流出現象にとって重要な場であることはいままでもない。筆者ら(3~5)は風化花崗岩斜面での一連の研究より、洪水流出機構は一次元鉛直不飽和浸透過程と飽和側方流過程で表現できることを示し、初期水分条件を評価しうる斜面流出モデルを提示した。

さて、林地斜面での流出機構を解明するには、土壌特性の異なる斜面での流出特性を検討するとともに、上記流出モデルの一般性を検討する必要がある。そこで、本報では第三紀層斜面での降雨流出実験の結果を風化花崗岩斜面での流出特性と比較、検討するとともに、上記流出モデルの適用性について検討した。

## II. 実験プロットと実験方法

実験プロットは、岩手大学御明神演習林の林地斜面に設けた。地質は多田(6)によれば第三紀層であり、母岩材料は石英安山岩質凝灰岩である。同プロットは、斜面長 2.5m, 斜面幅 2.0m, 地表傾斜角 36°, 基岩傾斜角 41°, 平均土層厚 56 cm, 空隙率 0.6 である。なお、土層は下流端で約 80 cm, 上流端で約 40 cm と下流ほど深い。植生は広葉樹であり、地表は自然状態に保たれている。プロット下流端はオープンカット断面で、ほぼ自然状態である。また、本プロットは斜面下部に位置する。このため、第三章以下で用いる自然状態での初期流量に関してはプロットの上部からの流入があり、これをプロット面積で除することからプロットのみ値より過大と考えられる。以下、本プロットを TP とする。

TP と流出特性を比較する風化花崗岩斜面は、既報(5)のプロット 1, 2 でありそれぞれ GP-1, GP-2 とする。

TP で用いた降雨装置および流出量の測定方法は、既報(5)と同様である。用いた降雨パターンは表-1 のとおりである。実験 No. 1~4 は、流出量が定常状態になるまで矩形ハイトグラフを与えた。No. 5~7 は、流出

量をいったん約 35 mm/hr に定常化させた後、35 mm/hr 以上の降雨を流出量が再び定常化するまで与えた。No. 10~15 で同一ハイトグラフが 2 回用いられているのは、異なる初期流量から与えたものである。

斜面流出モデルの数値計算に必要な体積含水率 ( $\theta$ ) とサクション ( $\psi$ ) の関係は、TP 近傍 3 か所に設置したテンシオメーターの値と採土による含水量測定により求めた。

## III. 実験結果

## 1. 基本的流出特性

本節では、既報(5)と同様の手法により TP における流出特性を示すと同時に、風化花崗岩斜面での特性と比較していく。なお、比較には平均土層厚などがほぼ等しい GP-2 と行う。

表-1 には、実験 No. 1~7 について流出量定常時の流出率  $q_0/r$  を示したが、各値とも 1.0 に近い。すなわち、プロット外への雨水流亡は、ほとんど認められない。また、流出は、すべて基岩上の飽和土層から生じた。

さて、図-1 は既報(5)の(1)式により定義した等価透水係数  $v_p$  と降雨強度  $r$  の関係を示している。これによれば、TP での  $r-v_p$  関係は、GP-2 とほぼ同じ傾向にある。すなわち、 $v_p$  は  $r$  とともに増加し、初期流量 ( $q_0$ ) が大きい場合には、 $v_p$  も同程度の  $r$  に対し大きくなる。一方、 $q_0$  を人工的に大きくした場合の  $v_p$  は TP, GP-2 に大きな差異はみられないが、自然状態から行った実験による  $v_p$  には明らかに差異がみられる。これは、湿潤状態では両者の透水性の差が小さくなることを示している。

また、TP における減水係数  $\alpha$  の経時変化は、GP-2 と同様に時間の経過につれてピーク流量  $q_p$  の影響が小さくなり、 $q_p$  によらず一定値を示す傾向にあった。図-2 は、降雨停止後 30 分~1 時間の  $q_p$  と  $\alpha$  の関係を示

\* Takeshi OHTA & Minoru ABE: Research on runoff from hillsides by one-dimensional transient saturated-unsaturated flow (III) Application of the runoff model to a tertiary soil slope

本研究の一部は、第 95 回日本林学会大会において発表した。

本研究は昭和 58 年度文部省科学研究費(奨励 A, 58760101)によった。

\*\* 岩手大学農学部 Fac. of Agr., Iwate Univ., Morioka 020

表-1. 人工降雨実験の諸元  
Summary of experimental rainfalls

Exp. No.	Rainfall intensity (mm/hr)	Duration (min)	The ratio of runoff in the steady state for each hydrograph ( $q_s/r$ )
1	34.6	120	0.994
2	46.2	140	0.965
3	57.7	100	0.998
4	80.8	90	0.960
5	57.7	40	
	34.6	40	
	46.2	40	0.996
6	57.7	50	
	34.6	40	
	57.7	40	0.998
7	57.7	50	
	34.6	40	
	80.8	40	0.931
8	57.7	20	—
9	57.7	40	—
10,11	34.6	10	
	46.2	10	
	57.7	10	
	80.8	10	—
	57.7	10	
	46.2	10	
	34.6	10	
12,13	34.6	10	
	46.2	10	
	57.7	10	—
	80.8	10	
14,15	80.8	10	
	57.7	10	
	46.2	10	—
	34.6	10	

In Exp. (8)~(15), there was no steady state for each hydrograph, and therefore, values of  $q_s/r$  in these experiments are not given.

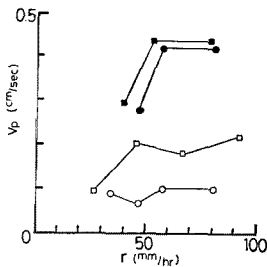


図-1. 降雨強度 ( $r$ ) と等価透水係数 ( $v_p$ ) の関係  
Relationship between the rainfall intensity ( $r$ ) and the equivalent coefficient of permeability ( $v_p$ )

Tertiary soil (TP): ●  $q_0=35$  mm/hr (by artificial rainfall), ○ natural condition ( $q_0=0.121\sim0.727$  mm/hr); weathered granitic soil (GP-2): ■  $q_0=26$  mm/hr (by artificial rainfall), □ natural condition ( $q_0=0.006\sim0.082$  mm/hr)

しているが、これによれば両プロットの  $\alpha$  の分布範囲に大きな相違は認められない。

以上、TP での基本的流出特性を簡単に述べたが、風

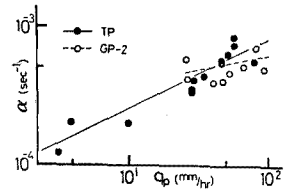


図-2. ピーク流量 ( $q_p$ ) と減水係数 ( $\alpha$ ) の関係  
Relationship between the peak discharge ( $q_p$ ) and the recession coefficient ( $\alpha$ )  
30 min~1 hr after end of rainfall

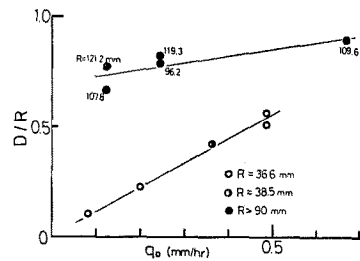


図-3. 初期流量 ( $q_0$ ) と洪水流出率 ( $D/R$ ) の関係  
Relationship between the initial discharge ( $q_0$ ) and the ratio of storm runoff ( $D/R$ )

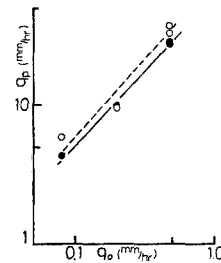


図-4. 初期流量 ( $q_0$ ) とピーク流量の関係  
Relationship between the initial discharge ( $q_0$ ) and the peak discharge ( $q_p$ )  
—● Observed, ...○ calculated

化花崗岩斜面と共通する特性を示している。すなわち、両斜面とも洪水流出発生特性は、基本的に同じと考えられる。

## 2. 初期水分条件と洪水流出

既報(3)では、GP-1 での自然降雨による流出観測より、初期流量  $q_0$  により総降雨量 ( $R$ )-洪水流出量 ( $D$ ) 関係が異なることを示した。また、同様の傾向が流域単位においても遠藤ら(1)等により示されている。本節では、TP での初期水分条件の影響を検討する。なお、第II章で述べたように本プロットは斜面下部を利用しているため、 $q_0$  はプロットのための値ではないが乾湿の指標として用いる。

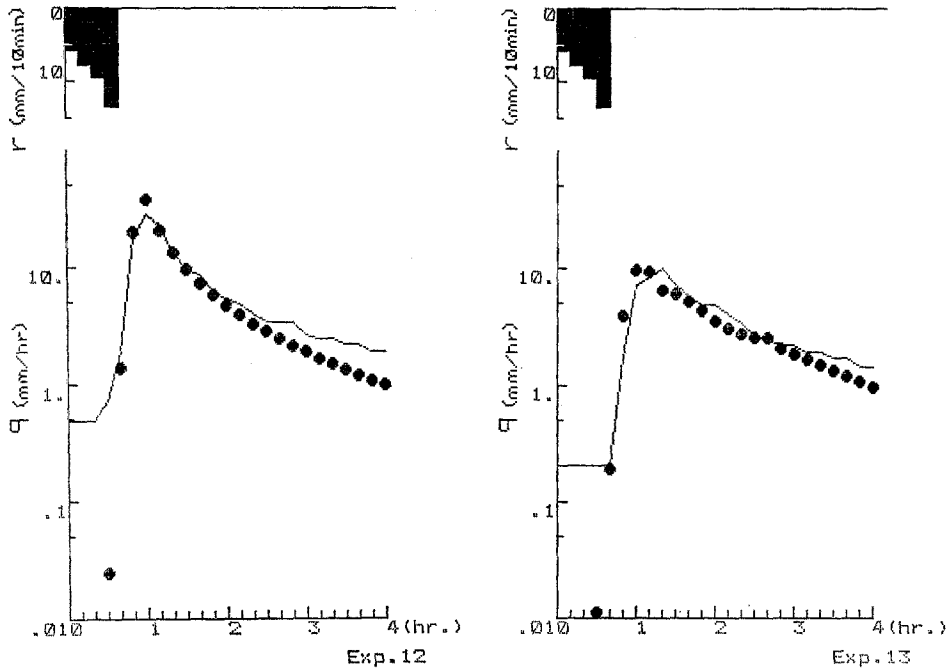


図-5. シミュレーション結果の一例  
 Examples of the analysis by the runoff model  
 — Observed, ● calculated

図-3 は、 $R=36.6, 38.5 \text{ mm}$  と  $R>90 \text{ mm}$  の実験についての  $q_0-D/R$  関係を示している。これより、前者については明確な増加関係が認められることは注目される。一方、後者では  $R$  にばらつきがあるためばらつきが生じているが同様の傾向が認められる。

次に、総降雨量、最大降雨強度の等しい実験 No. 12~15 についてのハイドログラフについて検討する。同一ハイドログラフに対しては、 $q_0$  の大きいものがハイドログラフの立ち上がりが早くなり、ピーク流量も大きい(図-5 参照)。図-4 は、これら4実験での  $q_0-q_p$  関係(●印)を示しているが、明確な増加関係にある。

以上のように、初期水分条件は洪水流出量のみでなく、ハイドログラフの波形にも影響を与えている。

IV. 斜面流出モデルの適合性

1. モデルの構成

本節では、モデルについて概説する。

洪水流出に関する流出機構は、基岩までの一次元鉛直不飽和浸透過程と基岩上の飽和側方流過程で表現される。前者には RICHARDS により不飽和域へ拡張されたダルシー則、後者には飽和ダルシー則に基づくキネマティック・ウェーブ法を用いる。基礎式とその解法は既報

(5)のとおりである。

体積含水率( $\theta$ )-サクシオン( $\psi$ )関係は、KLUTE(2)の経験式

$$\theta = \theta_0 \cdot \frac{\cosh\left(\frac{\psi}{\psi_0}\right)^\beta - \frac{\theta_0 - \theta_r}{\theta_0 + \theta_r}}{\cosh\left(\frac{\psi}{\psi_0}\right)^\beta + \frac{\theta_0 - \theta_r}{\theta_0 + \theta_r}} \quad (1)$$

$\theta_0$ : 空隙率,  $\theta_r$ : 気乾含水率,  $\beta, \psi_0$ : 土壌特性パラメータ

を用いた。また、不飽和状態での透水係数  $K(\theta)$  は、 $\theta$  により指数的に減少するとした。

モデルに用いたパラメータは、飽和透水係数 ( $K_s$ ) は図-1 に示す  $v_p$  の最大値より  $0.45 \text{ cm/sec}$ ,  $\theta_r$  は10日間風乾後の値より  $0.02$ ,  $\beta$  と  $\psi_0$  は第II章に示した測定結果よりそれぞれ  $-0.2, -1,000$ ,  $K_s$  に対する  $K(\theta_r)$  のオーダーの低下はトライアルより  $8.5$  とした。

初期水分状態は、鉛直方向には全水頭が一定と考えるが、斜面長方向には初期水分条件を次式によって評価する。

$$\left. \begin{aligned} \psi &= H - M \cdot z_m \\ z_m &= l_m \cdot \tan I \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$H$ : 基準面でのサクシオン,  $l_m$ : 水平方向の位置,

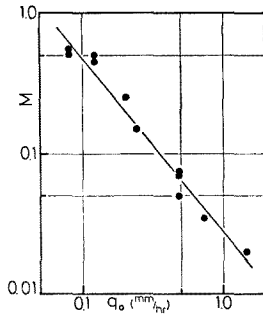


図-6. 初期流量 ( $q_0$ ) と水分分布係数 ( $M$ ) の関係  
Relationship between the initial discharge ( $q_0$ ) and the coefficient of initial water content ( $M$ )

$z_m$ :  $l_m$  での基準面からの高さ,  $I$ : 基岩傾斜角,  
 $M$ : 水分分布係数

土層厚は第II章に述べたように下流側ほど深いため、モデル上六つの単位斜面に等分し下流より 75, 70, 65, 60, 50, 40 cm の土層厚を用いた。なお、(2) 式により初期水分条件を与えるに際しては、下流端単位斜面底面において  $\psi=0$  を常に与えた。

## 2. 適用結果

解析に用いる  $M$  は、解析期間の総流出量が実測値の 80~100% になることを一応の基準としてトライアルにより決定した。解析には、実験 No. 2~6, 10~15 の 11 実験を用いた。

図-5 は、シミュレーション結果の 1 例である。これより、風化花崗岩と同様に計算値の減水勾配がやや大きいが、実測値の特徴をよく再現している。また、図-4 に No. 12~15 についてモデルによる  $q_0$ - $q_p$  関係をあわせて示した。これより、計算の  $q_p$  がやや大きくなるが、実測値にほぼ適合している。このように、本モデルの考え方は TP に対しても適用でき、また初期水分条件がハイドログラフ波形に与える効果もほぼ再現しうる。

図-6 は、 $q_0$  と解析に用いた  $M$  の関係を示している。これより、TP における  $q_0$ - $M$  関係も、GP-1 と同様に指数的減少関係にあることがわかる。この関係を近似すれば、

$$M = 2.77 \times 10^{-2} \cdot q_0^{-1.24} \quad (3)$$

となる。ここで、第II章で述べたように TP での自然状態における  $q_0$  は過大であると考えられることから、(3)

式中の係数は実際より過大と考えられる。一方、べき数に関しては、自然状態での集水域が変化しないものと仮定すれば、TP に関する固有値となる。ここで、(3) 式中のべき数は、土層厚、基岩傾斜角などは異なっているが既報(3)で示した GP-1 に対する  $-1.21$  と近い値を示している。

以上の本モデルの適合結果より、第三紀層斜面に関しても風化花崗岩斜面と同様の洪水流出機構を考えることができる。また、対象斜面の母岩材料によらず、初期流量 ( $q_0$ ) と水分分布係数  $M$  の関係はともに指数的減少関係を示すことは注目される。

## V. おわりに

本報では、第三紀層斜面において風化花崗岩斜面と同様の手法によりその洪水流出特性を検討した。その結果、基本的特性は両斜面とも同傾向にあることが示された。また、一次元鉛直不飽和浸透を用いた斜面流出モデルは、第三紀層斜面に対しても良好な適合性を示した。

このことから、本モデルは林地斜面における浸透流出による洪水流出に対する物理モデルとしての有用性があるものと考えられる。そして、本モデルにより土壌特性、土層厚分布などが洪水流出に与える影響を検討することが可能となろう。

なお、本研究に際し、岩手大学農学部石橋秀弘教授にご助言をいただいた。

## 引用文献

- (1) 遠藤治郎・荒井 賛・後藤宏二: 会津森林理水試験. 日林東北支部会誌 33: 251~253, 1981
- (2) Klute, A.: Soil water profile development under a periodic boundary condition. Soil Sci. 117: 265~271, 1974
- (3) 太田岳史: 一次元鉛直不飽和浸透を用いた雨水流出特性の検討(II) 初期水分条件と直接流出特性. 日林誌 65: 448~457, 1983
- (4) ———: 窪田順平: 一次元鉛直不飽和浸透を用いた山腹斜面域からの洪水流出解析. 第 28 回水理講演会論文集: 535~540, 1984
- (5) ———: 福嶋義宏・鈴木雅一: 一次元鉛直不飽和浸透を用いた雨水流出特性の検討. 日林誌 95: 125~134, 1983
- (6) 多田元彦: 岩手大学農学部附属御明神演習林の地形と地質について. 岩手大農演報 7: 1~14, 1976

(1984 年 4 月 26 日受理)