

II - 43

不飽和浸透理論を用いた流出解析について

苫小牧工業高等専門学校 正会員 八田茂実
 北海道大学工学部 フェロー会員 藤田睦博
 専修大学北海道短期大学 正会員 山梨光訓

1. はじめに

河川流出量の形成に寄与する地中水は、その大部分が表層土壌内を不飽和状態で流動しており、この解析には不飽和浸透理論が有用である。不飽和浸透理論を実流域に適用するには、対象とする流域に応じて適切な浸透流の発生領域とその境界条件を定めなくてはならない。とりわけ、山地流域においては降雨損失に関わる深層土壌への浸透が大きいたことが予想され、基本的には不飽和浸透理論の中に下層への浸透を許す境界条件を設定すべきである。窪田¹⁾は損失量の大きい山地小流域に対して、浸透流発生領域と難透水層とが接する部分に浸透を認める境界条件を設定して、不飽和浸透理論による解析を行っている。しかし、下層への浸透量自体を測定することが困難であるため、この境界条件の適合性を物理的に検証することは事実上不可能である。

一方、従来から提案されている流出モデルには、モデル自体に損失機構を内蔵しているものもある。これらのモデルのうち、タンクモデルは現在広く用いられている流出モデルの1つである。このようなモデルでは、妥当な有効雨量を推定することによって実測流量を再現しているものと考えられる。本研究では、流域の損失機構のモデル化を目的として、試験流域の観測結果を参考に、深層への浸透を認める様な境界条件を不飽和浸透理論に与え、これを用いて試験流域の流出量・浸透量の算定を行った。設定した境界条件の適合性の検証には、不飽和浸透理論で計算された浸透量とタンクモデルの最下段タンクからの浸透量との比較を行った。

2. 対象流域の概要

対象とした流域は、美唄市に位置する上中の沢流域で、流域面積 0.148km² の小流域である(図-1)。流域内の観測地点は、図-1中のA、Bの2地点で、流量・水温・気温をほぼ一年を通じて、C地点では地表下面下35cm、70cm、120cmにおけるサクシジョンの測定を行っている。雨量データは流域から200mほど離れた専修大学北海道短期大学内で観測した。流域内は粘土性の洪積丘陵で雑林地となっている。流域内の土壌は、図-1中に示すように、表層5cm～15cmは笹や樹木の根茎が発達したA₀層で、地表下面下40～60cm程度までは腐植を多く含む礫混じりのシルト質の土壌(A層)、それ以深はシルト分を多く含む粘土質のB層となっており、地表下面下120cm以深からはグライ化した粘土が混ざるようになってくる。基岩層などの明確な遮水層は確認できなかったが、降雨終了直後に流域内にいくつか見られる崩壊面の目視観測を行ったところ、上層のシルト質土壌と粘土層との境界付近からの地下水の浸みだしが確認されている。図-2は1996年6～11月にC地点で観測したサクシジョンの時間的な変化を示したものである。図によれば、降雨に対して地表下面下35cm地点のサクシジョンは大きく変動しているが、それ以深の70cm・120cm地点では降雨に対してサクシジョンの変動はほとんど見られないことが分かる。以上のようなことから、試験流域においては降雨流出のような応答の早い流出は、上層のシルト質土壌からの側方浸透流の影響が大きい

Study on flood runoff analysis based on unsaturated flow theory

by Shigemi HATTA, Mutsuhiro FUJITA and Mitsunori YAMANASHI

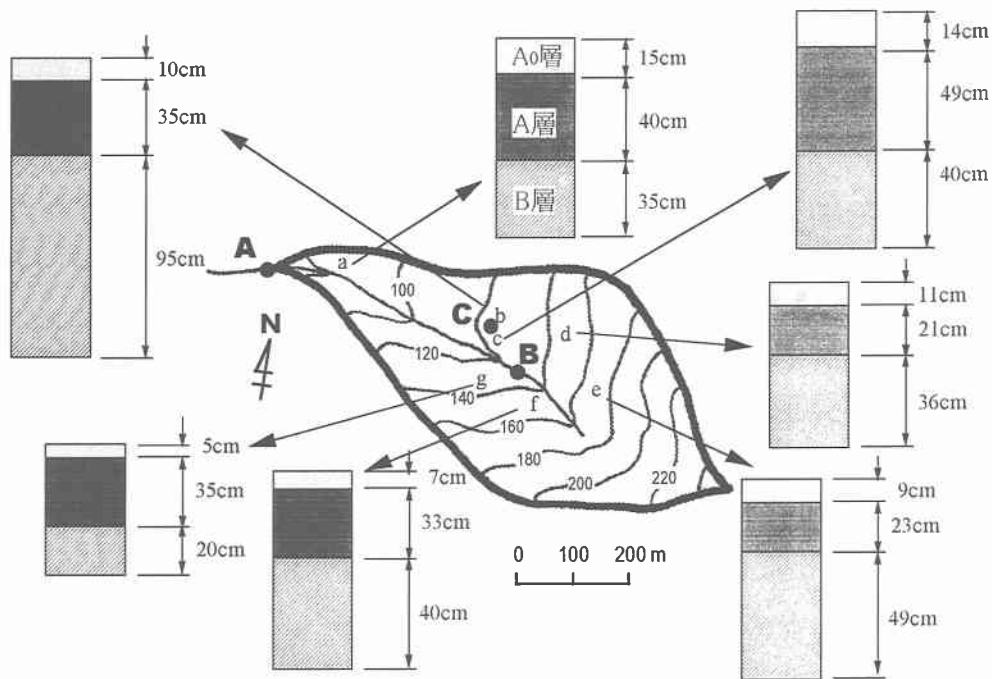


図-1 対象流域の概要

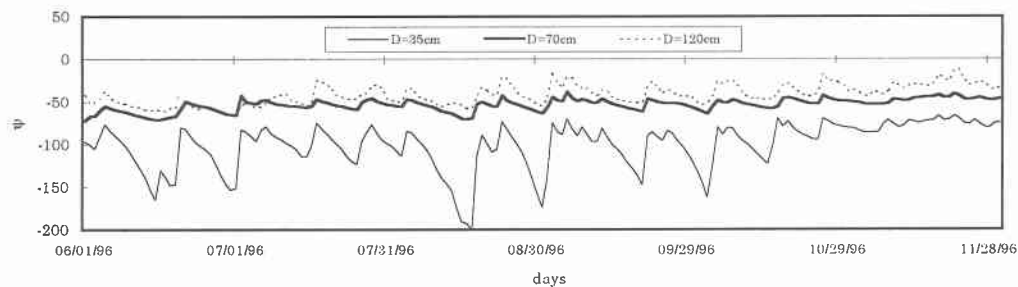


図-2 サクシヨンの時間的变化(96年6月1日～11月30日)

ものと推測される。

一方、本研究では上層のシルト質土壌、下層の粘土質土壌からそれぞれ試料を採取し、植物の根や粒径の大きな石を取り除いた後、現場密度に一致するように試験容器に充填して、土壌水分特性、飽和・不飽和透水係数の測定を行った。実験により得られた土壌水分特性曲線・不飽和透水特性を図-3, 4に示す。今回行った試験の範囲では、土壌水分特性曲線は上層土壌と下層土壌で大きな差は見られないが、下層土壌は飽和付近で透水係数が上層土壌のものよりも小さく、ほぼ一定の値を取る傾向が見られた。

本研究では、これらの調査・実験結果に基づいて不飽和浸透理論の適用を検討をすすめていくが、今回の解析では、94年9月16日～28日、95年8月18日～23日、10月17日～29日の3期間にB地点で観測された降雨出水資料を用いることとした。

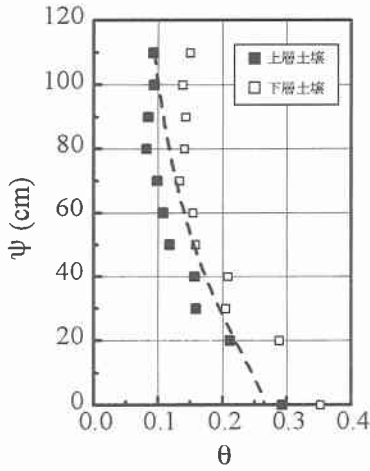


図-3 流域土壌の土壌水分特性
(破線はシミュレーションで採用した曲線)

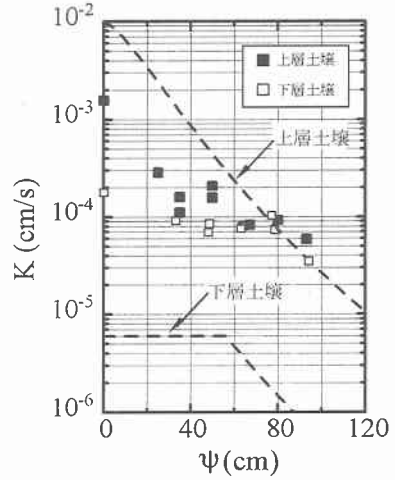


図-4 流域土壌の不飽和透水係数
(破線はシミュレーションで採用した曲線)

3. 不飽和浸透理論の適用

本研究では山腹斜面の現象が鉛直・斜面流下方向の2方向流れであることから2次元の不飽和浸透理論を採用することにする。2次元の不飽和浸透流の基礎式はよく知られたRichardsの式で、図-5の座標系の下で次式のように与えられる。

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin \alpha \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - \cos \alpha \right) \right] \quad (1)$$

ここに、 $C(\psi)$:比水分容量、 $k(\psi)$:不飽和透水係数、 ψ :サクションである。

流域は主として2斜面で構成されているため、対象流域を河道長1000m、斜面長69m、斜面勾配0.4 radの矩形流域に近似する。また、土層の構造は現地斜面との対応を考え、地表面下50cmまでのシルト質土壌が洪水流の大部分を形成するものと考え、それ以深への浸透は流出に関わらない損失量として見なすものとした。境界条件としては次式を採用した。

$$x = 0: \frac{\partial \psi}{\partial x} = \sin \alpha \quad (2)$$

$$x = l: \begin{cases} \partial \phi / \partial x = 0 & (\text{unsaturated}) \\ \psi = 0 & (\text{saturated}) \end{cases} \quad (3)$$

$$z = 0: \frac{\partial \psi}{\partial z} = \cos \alpha \left(1 - \frac{R}{k(\psi)} \right) \quad (4)$$

$$z = d: \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

ただし、 ϕ は全水頭である。

式(2)～(4)までの境界条件は、不飽和浸透理論の計算

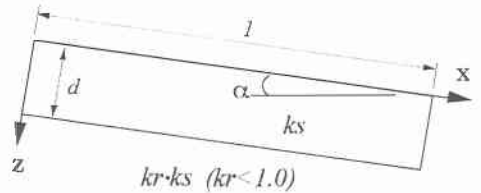


図-5 不飽和浸透理論の計算座標系

表-1 採用した不飽和浸透理論の各係数

kr	K_B (cm/s)	a (cm ⁻¹)	n	$\theta_s - \theta_r$	k_s (cm/s)	β
0.02	6.0e-6	0.018	1.4	0.237	1.0e-2	5.0

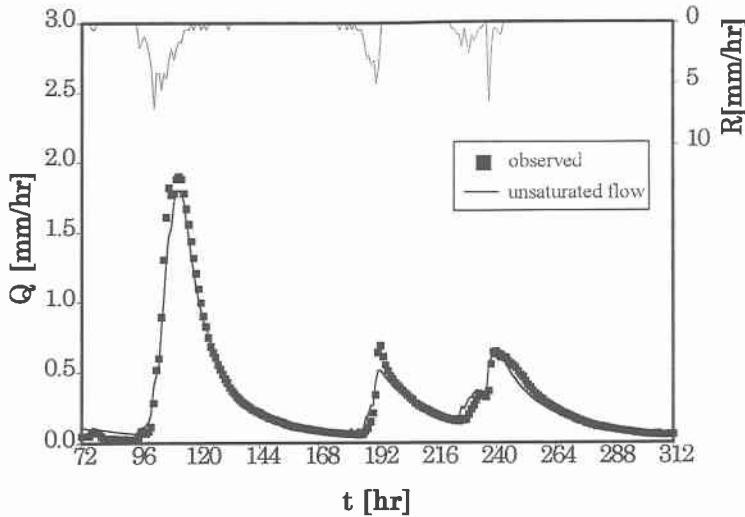


図-6 不飽和浸透理論による流出量の再現結果(94年9月)

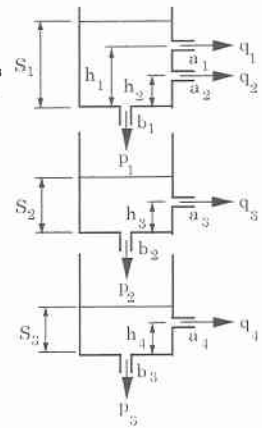


図-7 直列3段タンクモデル

を行う場合に一般的に用いられているものである(例えば松林ら²⁾)。式(5)の境界条件は、上層土壌から下層への浸透を認める境界条件として、窪田らの採用している境界条件と同様のものである。結局、これらの境界条件を用いると、流出量は上層末端からの流出量、損失量は上層と下層の境界を通過する量として次式のように表わされる。

$$Q = \left[\int_0^d k(\psi) \cdot \left(\sin \alpha - \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) dz \right]_{x=l}, \quad P_3 = \left[\int_0^l k(\psi) \cdot \cos \alpha dx \right]_{z=d} \quad (6)$$

ここで、 Q :流出量、 P_3 :損失量である。

一方、式(1)は単独で解くことができず、 $k-\theta$ 、 $\theta-\psi$ の2つの関係式が必要となる。ここでは、次式を用いることとした。

$$\theta = \frac{1}{1 + (a|\psi|)^{n_1}} (\theta_s - \theta_r) + \theta_r, \quad k(\theta) = k_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\beta \quad (7)$$

ここで、 θ_s は飽和時の体積含水比、 θ_r は残留含水比、 a, n_1, β は土壌のパラメータである。

上式の各定数は実験結果を参考にして、実測ハイドログラフと一致するように定めるものとした。ただし、下層の粘土層に関しては、実験結果から

- 1) $\theta-\psi$ 関係が上層のものとはほぼ一致すること、
- 2) 透水係数が上層よりも小さく、飽和付近ではほぼ一定の値を示すこと

から、 $\theta-\psi$ 関係は上層と同一とし、 $k-\theta$ 関係については最大の透水係数を設定し、次式のように表わすものとした。

表-2 採用したタンクモデルのパラメータ

a_i (1/hr)	h_i (mm)	b_i (1/hr)
a_{11}	0.0545	h_{11} 23
a_{12}	0.0340	h_{12} 12
a_2	0.0720	h_2 4
a_3	0.0660	h_3 1
		b_1 0.0250
		b_2 0.0530
		b_3 0.0695

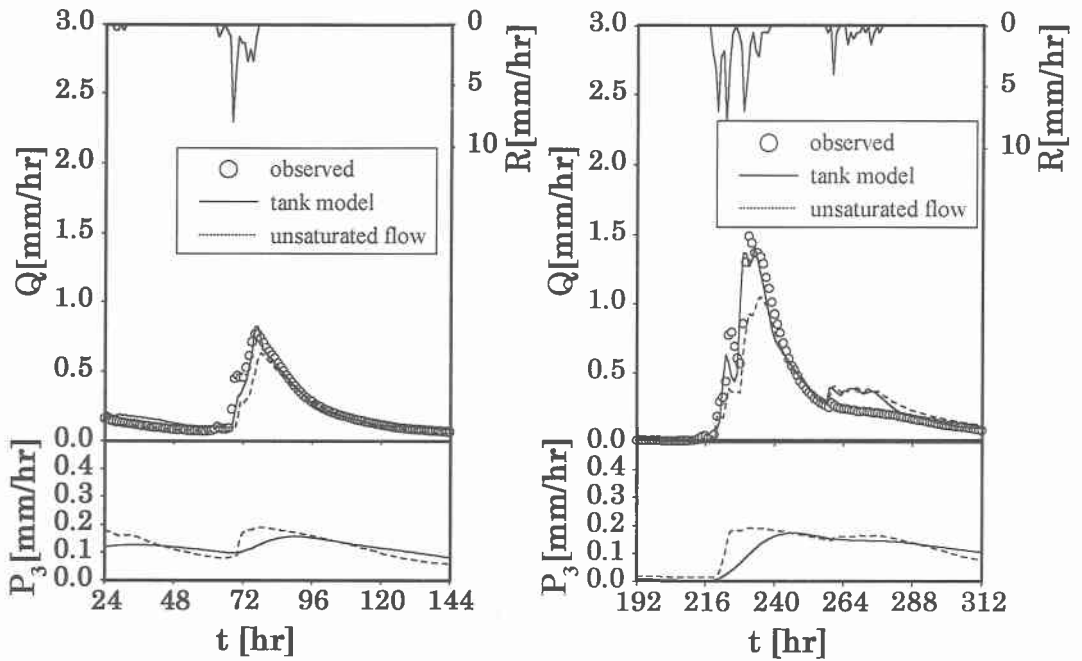


図-8 不飽和浸透理論とタンクモデルによる流出量・浸透量の計算結果(左:95年8月, 右:95年10月)

$$k(\theta) = \min \left[kr \cdot k_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^p, K_B \right] \quad (8)$$

ここで、 kr :上層の透水係数に対する比、 K_B :下層の土壌の透水係数の最大値である。

94年9月16日～28日の期間に断続的に降った降雨を対象として、試行錯誤的に不飽和浸透理論の各種の定数を定めた結果を表-1、および図-2,3中の曲線として示す。 $\theta-\psi$ 関係については実験結果と似た結果となっているが、不飽和透水係数に関しては、上層で実験値の10倍程度、下層では実験値の1/20程度の値となっている。実験が攪乱試料によるものであることや、透水係数の分布がきわめて不均質なことを考慮すればやむを得ないものと考えられる。同定したパラメータを用いて流出量を再現した結果を図-6,8に示す。いずれの期間においても観測流量と計算流量の概形はよく一致しており、同定された不飽和浸透理論の各定数は妥当なものといえる。

4. タンクモデルの適用

本研究では図-7に示すような直列3段のタンクモデルを用いて解析を行った。

採用したタンクモデルの11個のモデルパラメータは94年9月16日～28日の期間の降雨を対象として、嵯峨・星³⁾によって提案されている成分回帰による最適化手法を用いて同定した。これによって得られたタンクモデルパラメータを表-2に示す。

図-8は同流域の95年8月、10月の降雨に対してタンクモデルと不飽和浸透理論によって計算された流出量と損失流量を比較したものである。図中の記号 Q, P_3 はそれぞれ河川流量、損失流量を表わしている。

タンクモデルでは側方流出孔からの流出量の和 ($q_{11}+q_{12}+q_2+q_3$) と最下段タンクからの浸透量(p_3)が Q, P_3 にそれぞれ相当する。不飽和浸透による流出量がピーク流量付近で小さくなっているが、損失流量はタンクモデルで計算されるものとはほぼ一致しており、タンクモデルによって計算される損失流量は、深部への浸透量と対応したものであることが分かる。また、このことは、タンクモデルにより計算される損失流量が不飽和浸透理論の底部の境界条件の決定に有用な情報を与えることを示す。

6. おわりに

本研究では、試験流域の調査結果を参考にして、深層への浸透を許容する境界条件を与えた2次元の不飽和浸透理論を試験流域に適用した。計算された流出量は実測流量と一致し、今回仮定した不飽和浸透領域底部の境界条件を用いることによって、有効雨量を考慮することなく、全流出量の算定が可能である。また、深層への流出量についてもタンクモデルで計算される最下段からの浸透量とよく一致することが確認された。この結果は、今回仮定した不飽和浸透理論の境界条件が妥当なものであったことを示していると同時に、タンクモデルが単なる概念的なモデルではないことを示唆するものであると考える。しかし、現在のところ1流域での例でしかなく、他の流域での検討が必要である。今後更に、ダム流域のような流域スケールでの解析を念頭に置いた場合、不飽和浸透理論を全流域に適用することは計算量の面からも困難である。このため、損失量を考慮した形の不飽和浸透理論の集中化についても検討が必要と考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたりまして、室蘭工業大学藤間教授からは不飽和透水試験に関して多くの助言を戴きました。また、流域土壌に関する各種の実験には、苫小牧工業高等専門学校池浦勲教授並びに学生の市橋隆二君、及川 圭君、繁在家 祐君の協力を得ました。ここに記して感謝の意を表わします。

参考文献

- 1) 窪田・福冨・鈴木：山腹斜面における土壌水分変動の観測とモデル化，日本林学会誌，69(7)，258-269，1987.
- 2) 松林・高木・古田：不飽和浸透理論に基づく斜面流出モデルの集中化について，土木学会論文集，497/11-28，11-20，1994.
- 3) 嵯峨・星：タンクモデルパラメータの最適化に関する研究，水文・水資源学会1994年研究発表会要旨集，210-213，1994.