

II-36

植生が長・短期流出に及ぼす効果に関する研究

北海道大学 正員 藤田 睦博
北海道大学大学院 学生員 高橋 一浩
北海道開発局 正員 平野 道夫

1. はじめに

植生が降雨-流出過程に及ぼす影響は決して小さくはない。例えば、降雨は植物の葉や幹による遮断により、一部は蒸発し、一部は樹冠流出を経ることにより降雨波形をかえる。一方、土中を流れる浸透流の一部は根より吸収されることにより短期流出における基底流出に変化をもたらただけではなく、年単位で水収支を考えるうえでさらに大きな影響をもたらすと考えられる。これとは別に根や根跡の存在、および葉もしくは植物の腐敗により地表面を覆う土壌の特性も変化し、これが流出に与える影響はかなり大きいと考えられる。そこで本論文では二次元不飽和浸透流の理論を用いることにより、根の吸収や土壌特性の違いによる短期流出での違いを数値解析により確かめるとともに、それをもとに植生が長期流出に及ぼす影響について考察することとする。

2. 数値計算の方法・条件

2-1 根による吸収を考慮した二次元不飽和浸透流基礎式

不飽和浸透流の解析によく用いられているRichardsの方程式を座標系を図-1のようにおいた斜面でたてると(1)式ようになる

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K \frac{\partial \psi}{\partial x} - K \sin \alpha \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K \frac{\partial \psi}{\partial z} - K \cos \alpha \right\} + \text{SINK} \quad (1)$$

ψ : 圧力水頭(cm)、 K : 不飽和透水係数(cm/sec)、 θ : 体積含水率、 t : 時間座標(sec)、 α : 斜面の角度、 SINK : 根による吸収項(1/sec)

で(2)式のように表せる。(図-2 参照)

$$\text{SINK}(\phi, z) = (\phi_{er} - \phi) / R \quad (2)$$

ϕ_{er} : 植物内部の圧力水頭(cm)、 R : 吸収時の通導抵抗(cm・sec)で(3)・(4)・(5)式に示すような3つの抵抗の和で表すことができる。

(a) 土壌中を根に向かって流れる水に対する抵抗 : R_s 、

$$R_s = [B \cdot L_v \cdot K]^{-1} \quad (3)$$

L_v : 単位体積あたりの根密度(cm/cm³)、 B : 定数で 4π 。

(b) 根表面より根内部の導管への水移動に対する抵抗 : R_r 、

$$R_r = \frac{\theta_s}{\theta} \cdot \frac{r_r}{L_v} \quad (4)$$

r_r : 単位長さの根における透過抵抗(sec/cm)、 θ_s : 飽和時の体積含水率で土の間隙率と等しい。

(c) 根導管内の水移動の抵抗 : R_a 、

$$R_a = \frac{r_a \cdot L \cdot \Delta z}{\alpha \cdot L_v} \quad (5)$$

r_a : 導管の通導抵抗(sec/cm³)、 L : 地表面から吸水点までの導管の長さ(cm)、 α : 根の屈曲度を表すパラメータ。

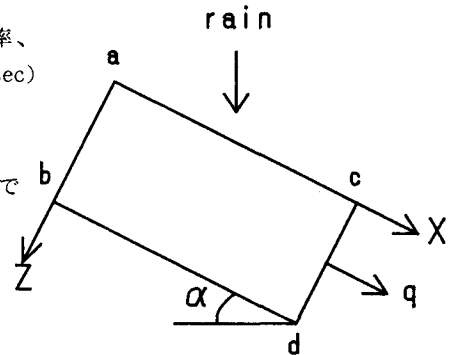


図-1 概念図

Effect of Vegetation upon Long and Short Term Runoff

by Mutsuhiro FUJITA, Kazuhiro TAKAHASHI and Michio HIRANO

K、 θ は ψ の関数であり、谷の関係式を用いて(1)式を ψ のみの関数に書き換える。

$$\theta(\psi) = (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi}{\psi_0} + 1 \right) \exp\left(-\frac{\psi}{\psi_0}\right) + \theta_r \quad (6)$$

$$K(\psi) = K_s \left(\frac{\psi}{\psi_0} + 1 \right)^\beta \exp\left(-\frac{\beta\psi}{\psi_0}\right) \quad (7)$$

θ_r : 移動可能な水がほとんどないと考えられる体積含水率、 K_s : 飽和透水係数

(cm/sec)、 ψ_0 : 比水分容量 $C \left(= \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \right)$ を最大にする ψ の値(cm)、 β : 土壌の不

飽和領域における透水性の現象の程度を示す無次元パラメータ。(6)、(7)式を

(1)式に代入して整理すると(8)式となる。

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = A \left\{ \frac{\partial \psi}{\partial x} \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin \alpha \right) + \frac{\partial \psi}{\partial z} \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - \cos \alpha \right) \right\} - B \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right) - S \quad (8)$$

A、B、S はそれぞれ ψ の関数で(9)・(10)・(11)式のようになる。

$$A(\psi) = \frac{K_s \cdot \beta}{(\theta_s - \theta_r)} \left(\frac{\psi}{\psi_0} + 1 \right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{\psi}{\psi_0}\right) (1-\beta) \quad (9)$$

$$B(\psi) = \frac{K_s \cdot \psi_0^2}{(\theta_s - \theta_r) \cdot \psi} \left(\frac{\psi}{\psi_0} + 1 \right)^\beta \exp\left(-\frac{\psi}{\psi_0}\right) (1-\beta) \quad (10)$$

$$S(\psi) = \frac{\psi_0^2}{(\theta_s - \theta_r) \cdot \psi} \exp\left(-\frac{\psi}{\psi_0}\right) \cdot SINK \quad (11)$$

2-2 境界条件

ここで用いた境界条件は以下のようである。

$$a-b \text{ 面 : 分水面} \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = \sin \alpha$$

$$b-c \text{ 面 : 不透水層} \quad \frac{\partial \psi}{\partial z} = \cos \alpha$$

$$c-d \text{ 面 : 自由流出} \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = 0$$

$$a-c \text{ 面 : 降雨および根による吸収} \quad K \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - \cos \alpha \right) = -(rain \cdot \cos \alpha + T)$$

T : 地表面付近での根による吸収量であるが、ここでは地表面より $\Delta z/2$ までの吸収量を使用した。

2-3 計算方法および計算条件

ここで用いた計算方法は(8)式をCrank-Nikolson型で差分した後、SOR法による反復修復計算をおこなった。差分法、計算手法の詳細は文献(4)・(5)を参考にされたし。

計算条件のうちで計算によって値を変化させたのは、土の特性を示す K_s 、 θ_s 、 θ_r 、 ψ_0 、初期の ψ の分布、根の有無であり、降雨条件などその他条件は同じとし以下に示すようである。斜面長 = 500cm、土層厚 = 40cm、斜面勾配 $\alpha = 10^\circ$ 、 $\Delta x = 5\text{cm}$ 、 $\Delta z = 4\text{cm}$ 、 $\Delta t = 1\text{min}$ (収束しない場合は $\Delta t = \Delta t/10$ として繰り返す)、 $\beta = 2.0$ 、降雨強度・降雨継続時間は 6mm/hr で 6hr として全計算時間を 24hr とした。

a) 根の有無による比較

根のない場合は $SINK = 0$ とすると普通の不飽和浸透流の計算と同じとなる。根のある場合は $SINK$ 項を計算するパラメータを以下のようにした。 $\phi_c = -2500\text{cm}$ 、 $r_r = 5.0 \times 10^7 \text{min/cm}$ 、 $r_s = 5.0 \times 10^7 \text{min/cm}^3$ 、 $L = z$ 、 $\alpha = 0.7$ とし、単位体積あたりの根密度は $L_v = (40 - z)^2 / 160 \text{cm/cm}^3$ であらわす。この根の分布型は種々の植物が混ざった時に見られる深さ方向に急激に根密度が減少するタイプである。土の条件は土壌 II (後述)、

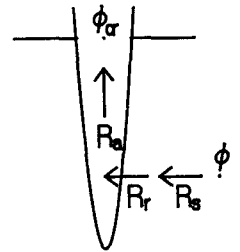


図-2 根の吸収による

水移動のモデル

初期条件は(12)式と統一している。

b) 初期条件の違いによる比較

初期条件としては(12)・(13)式の2通りを考え、(12)式は湿潤状態を想定し、(13)式は乾燥状態を表す。なお、両式は図-1のd点の ϕ を基準に鉛直方向にポテンシャル $\phi (= \phi - x \sin \alpha - z \cos \alpha)$ を一定とするように考えたものである。

$$\phi(x, z) = -(500 - z) \cdot \sin \alpha + (z - 40) \cdot \cos \alpha \quad (12)$$

$$\phi(x, z) = -(500 - z) \cdot \sin \alpha + (z - 40) \cdot \cos \alpha - 20 \quad (13)$$

土の条件は土壌Ⅱ、根は無しに統一している。

c) 土壌の特性の違いによる比較

土壌はシルト(土壌Ⅰ)、砂(土壌Ⅱ)、間隙率と飽和透水係数の大きい(土壌Ⅲ)砂の3通りを考え、それぞれの特性値は以下に示す。

土壌Ⅰ: $K_s = 0.01 \text{ cm/sec}$ $\theta_s = 0.48$ $\theta_r = 0.12$ $\phi_0 = -80 \text{ cm}$

土壌Ⅱ: $K_s = 0.02 \text{ cm/sec}$ $\theta_s = 0.44$ $\theta_r = 0.04$ $\phi_0 = -40 \text{ cm}$

土壌Ⅲ: $K_s = 0.03 \text{ cm/sec}$ $\theta_s = 0.65$ $\theta_r = 0.30$ $\phi_0 = -40 \text{ cm}$

初期条件は(12)式、根は無しに統一している。

3. 計算結果

a) 根の有無による比較

図-3は、根が有る場合と無い場合のc-d面からの流出量を比較したハイドログラフである。破線で示した根の無い方が実線で示した根が有る方に比べて流出量が多いことがわかるが、特に降雨継続時間中の立ち上がり部に比べて、降雨終了後の逓減部においてその差がはっきりと現れている。図-4, 5はこのときの ϕ の時間変化を示している。こちらやはり降雨終了後に違いがはっきりと現れてくる。図-5の根が有る場合の方が無い場合に比べて ϕ の増加が大きく、これは根が有る場合の方がそれだけ速く乾燥していくことを示すものである。流出量が

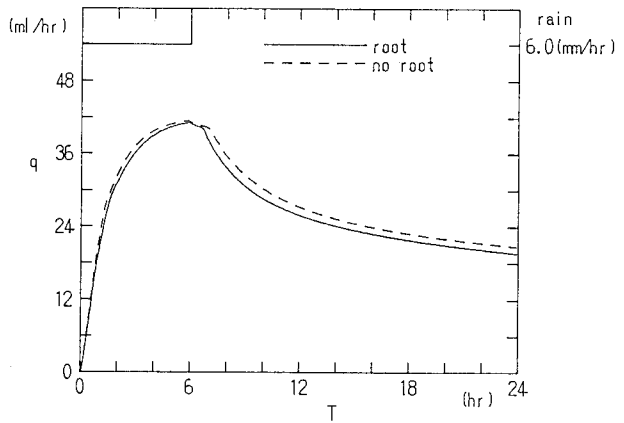


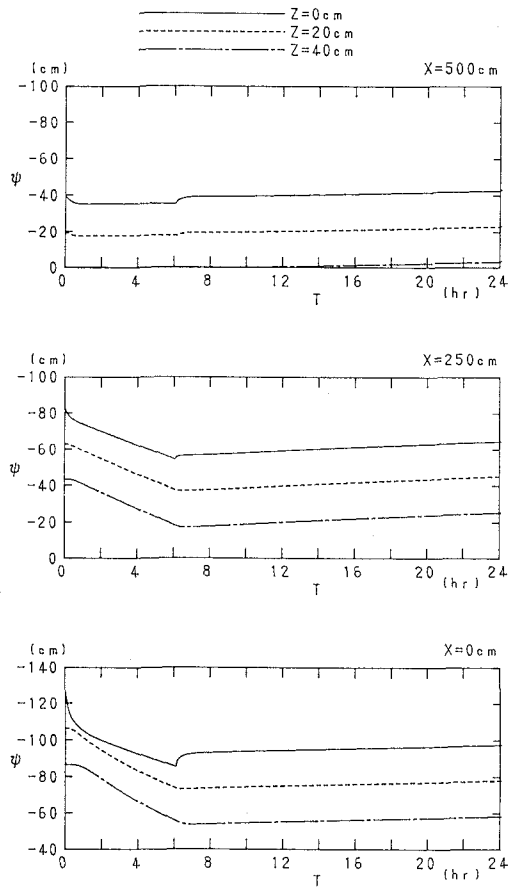
図-3 流出比較図(根の有無)

少ないのに乾燥が速く進むということは根の吸収の影響であると言える。また、乾燥がそれだけ大きくなるということは、次の降雨時の初期条件を構成するのに非常に大きな意味を持つと考えられる。一方でこの条件下ではピーク流量やハイドロの立ち上がりにおいては根の有無はさほど大きな影響を持たないということも言える。

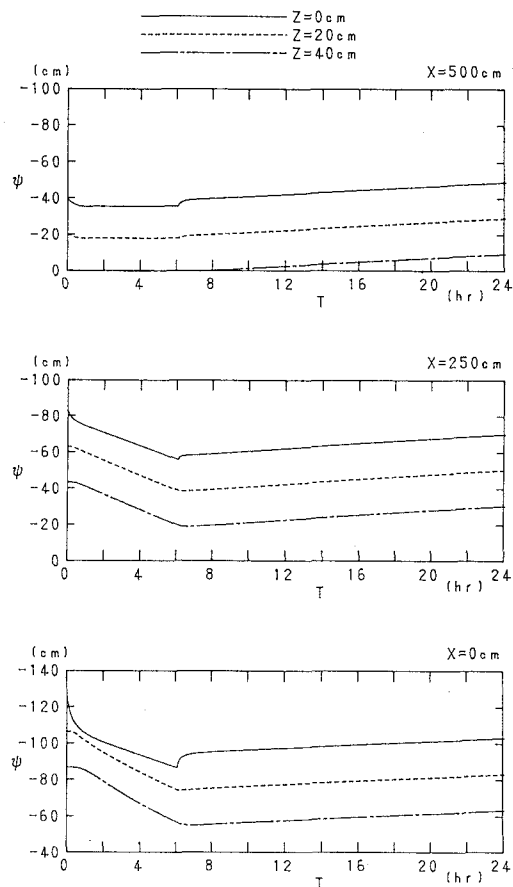
b) 初期条件の違いによる比較

図-6は初期条件の違う場合のc-d面からの流出量を比較したハイドログラフである。破線で示した乾燥型の方が圧倒的にピーク流量、総流出量が少ないことがわかる。これはもちろん土層内部に貯留された分少なくなっているためである。また湿潤型の場合 $t = 0 \text{ hr}$ から流出が始まっているのに比べて、乾燥型は $t = 4.5 \text{ hr}$ 付近で流出が始まっていることがわかる。これは湿潤型の場合d点において最初から飽和状態($\phi = 0 \text{ cm}$)を仮定しているため流出が起こり易くなっているためであろう。このように1雨レベルで考える場合は

初期条件は非常に大きな意味を持つと言える。

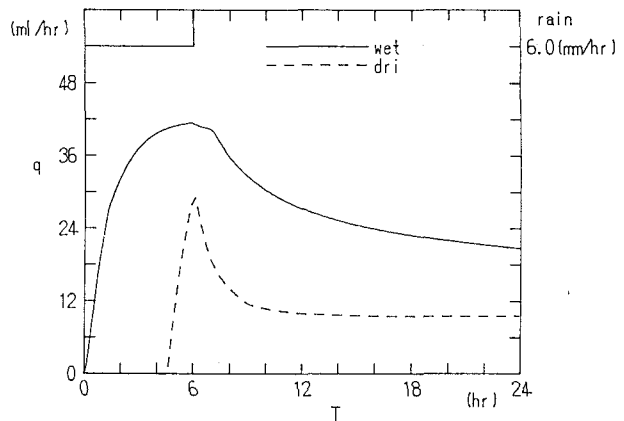


図－４　ψの時間変化（根無し）



図－５　ψの時間変化（根有り）

c) 土壌の特性の違いによる比較
 図－７は性質の違う３種類の土壌の場合のc－d面からの流出量を比較したハイドログラフである。透水係数の増大にともないピーク流量も、総流出量も多くなっていることがわかる。ただし、この計算に使用したモデルは土中の不飽和浸透流を対象としたモデルであるため、表面流出が生じた場合その流量分を無視してしまっている。例えば、実線で示した土壌Ⅰのタイプの場合 $t=1.5\text{ hr}$ の付近から流出量がほぼ一定となっているが、これはこの土壌が処理できる水分量の限界となっているためであり、土中へ浸透できなくなった雨水は表面流出



図－６　流出比較図（初期条件）

となって流れ落ちていることになっている。
したがって図-7で大きな値を示すほど土中を経由した雨水の量が多いこととなる。
このことは雨水がそれだけ根に接する機会を多く持つこと意味するものである。また本モデルではb-d面を不透水層として扱っているが、これを透水可能としその下に地下水脈がある場合など考えると更に大きな意味を持つと考えられる。また図-9には土壌Ⅲタイプの ϕ の時間変化を示したが図-4の土壌Ⅱにくらべて若干ではあるが乾燥速度が速いようである。これはやはり次の降雨時の初期条件を得るうえで大きな意味を持つと言える。

4. まとめ

一雨レベルの短期流出においては根の有無による流出量などには大きな違いが見られなかったが、非降雨時の内部の ϕ の変化には少なからず影響を及ぼしているようである。ゆえに無降雨期間が長くなるほど降雨開始時の初期条件は乾燥型になることになる。初期条件の乾燥型となるとそれだけ流出量が減り、雨水が土中に貯留される量が増大することになる。そしてこの水の1部は再び根より吸収され、葉より蒸散することとなる。このサイクルの繰り返しは年単位の水収支を考えるうえでは大きな意味を持つと考えられる。ただしある程度長期に渡る連続した降雨や、さらに降雨強度の大きい降雨についてはどの程度効果があるか判断するのは難しいところであり、今後の検討課題の一つと考えられる。また植生が無くとも地表面から蒸発が相当量起り土の水分量は減少するのだが、この場合は乾燥が地表面近傍に限られるためかえって地表面は乾燥しすぎてしまい、このことは不飽和浸透係数 K を非常に小さな値にしてしまい、降雨水を土中に受け付けず表面流（ Horton型表面流）を増大させてしまう結果となる。一方で土壌の性質の異なる場合の短期流出の形態は大きく異なるようである。もちろん本研究で用いた不飽和浸透流モデルでは表

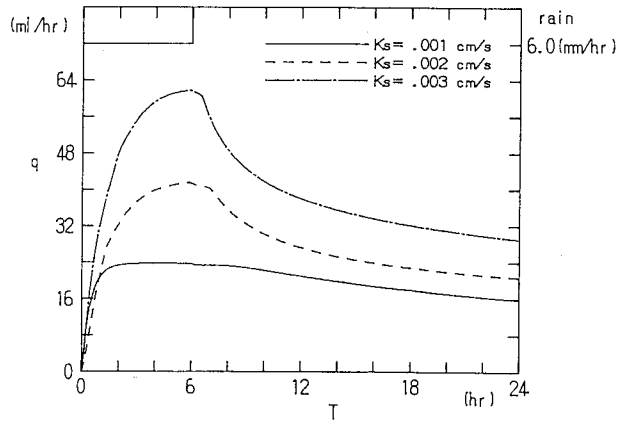


図-7 流出比較図（土壌特性）

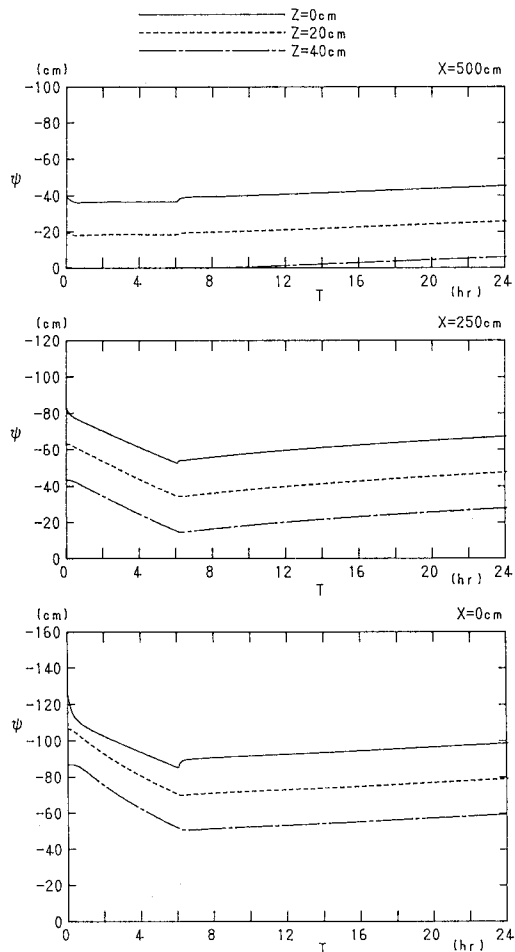


図-8 ϕ の時間変化図（土壌Ⅲ）

面流をうまく使えないため、斜面下部からの総流出量を比較するのは難しい。しかし先にも述べたが、土中を経由してくる水の方が流出のlossに寄与する確率は高くなると考えられるため植生のある土壌をモデル化したとされる土壌Ⅲのタイプは長・短期流出の両方で大きな影響を持つと考えることができる。しかし実際には、植林後ほぼ20年間は基底流出が減少し、その後基底流量が増加すると言われているが、植生による土層構造の変化までも考慮することは現在のところまだむずかしい。また少し話はそれるが、表面流は表層土を大量に流してしまうようであり、河川への土砂供給の点や斜面部における表層土の変化などの点からも植生が斜面流出に与える影響の一つとして考えてみる必要がありそうである。

5. おわりに

今後の方針としては、これまで何度も述べてきたように表面流出を考慮できるモデルを構築する必要があるようである。たとえば土中の浸透流部は現在の方法を用い、表面流出部はKinematic wave法を用いて計算すれば良いのではないかと考えられる。一方で降雨形態も現時点では矩形降雨のみを扱っているが、さらに実際の降雨波形に葉や幹による降雨遮断による降雨波形の変化をも考慮したモデルについても計算を行ってみたいと考えている。

謝辞 本研究は平成3年度・文部省科学研究費・一般研究(B)「ゴルフ場の造成が土砂流出、河川流量および水質におよぼす影響について」(代表: 藤田睦博)の助成のもとにおこなわれた研究である。ここに記して感謝の意を表す。

6. 参考文献

- 1) 石田朋晴・中野政詩: 土壌～植物～大気における土壌水分の消費動態
農業土木学会論文集 第92 PP26～34 1981
- 2) 谷 誠: 一次元鉛直不飽和浸透によって生じる水面上昇の特性
日本林学会誌 第64号 PP409～418 1982
- 3) 鈴木雅一: 降雨－流出過程における森林の影響
ハイドロロジー No 13 1983
- 4) 嵯峨 浩: 二次元不飽和浸透流の数値解について
土木学会北海道支部論文報告集 第42号 PP191～194 1986
- 5) 日野幹雄・太田猛彦・砂田憲吾・渡辺邦彦: 洪水の数値予報
森北出版 1989
- 6) 藤田睦博・高橋一浩・村上泰啓・SIAMAK BUDAGHPOUR・萩原敬也: 植生と流出
土木学会北海道支部論文報告集 第47号 PP365～370 1991