

京都大学 防災研究所 ○岡 太郎 角屋 睦

1. まえがき 丘陵地斜面域における雨水の保留・損失、表面流生起、雨水の浸入と地下水流出など流出現象の解明とそのモデル化を目的として、傾斜ライシメータにおける自然条件下の水文諸現象の観測研究を続けているが、今回は土壌水分の消長過程を考慮して流出機構を検討した結果について述べる。今回用いたモデルでは、ライシメータの土壌表面に不透水性の被膜が形成されることを考慮し、また高精度で長期間流出の解析を可能とするため土壌水分の解析領域を、土壌水分の変動の小さい部分は大きく、変動の大きい部分は小さく区分して、数値計算量の軽減を計った。ここでは、このようにして得た結果と傾斜ライシメータより得た実測値との対比により、このモデルの適応性について吟味する。

2. 裸地斜面域における流出モデル 図1に傾斜ライシメータの概略を示す。地表面に降った雨水は(i)不飽和帯を浸潤し、(ii)飽和帯に達した後地下水流動により下流端に流出するというモデルを考えている。なお強雨強度が大きく地表面において浸入しき水ない雨水は表面流として流下する。

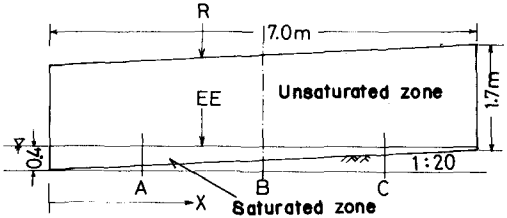


図1 ライシメータ概略図

(i)雨水の浸潤の解析 不飽和帯における土壌水分移動の解析には拡散理論と適用する。前報では(1)式を用いて解析を行なったが、ここでは次のような解法を採用した。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - K(\theta) \right] \quad \dots (1) \quad \theta: \text{土壌水分量 (体積含水率)}$$

$D(\theta)$: 拡散係数 $D(\theta) = K(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial \psi}$

t : 時間, z : 座標 (下向き正), $K(\theta)$: 透水係数。 (1)式は不飽和浸透流に拡張されたDarcy則(2), と連続の方程式(3)とかから誘導されるが、ここでは(2),(3)式をそれぞれ差分展開し、図2に示すように不均距離(ΔZ_n)で区分された領域で数値的に解析することにする。

$$q = -K(\theta) \frac{\partial \Phi}{\partial z} = -K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} + K(\theta) \quad \dots (2) \quad \text{ただし } \Phi = \psi - Z,$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z} \quad \dots (3) \quad \Phi: \text{total potential,}$$

ψ : capillary potential,

q : 土壌水分移動量。 (2)式, (3)式の差分近似式はそれぞれ(4), (5)式となる。

$$q_{n,n+1} = -K_{n,n+1} \times \frac{\psi_n - \psi_{n+1}}{\frac{\Delta Z_n + \Delta Z_{n+1}}{2}} + K_{n,n+1} \quad \dots (4) \quad \Delta Z_n: \text{距離増分,}$$

$$\theta_{t+\Delta t} = - \frac{\Delta t}{\Delta z} [q_{n+1,n} - q_{n,n+1}] + \theta_{t,n} \quad \dots (5) \quad \Delta t: \text{時間増分,}$$

$q_{n+1,n}$: $n-1$ 層から n 層

への水分移動量。ここで土壌が層状をなしていることを考慮して、 $K_{n,n+1}$ はR.J. Hanks and S.A. Bowers が採用している関係式と同等な(6)式を用いて計算することにする。

$$K_{n,n+1} = \frac{\frac{\Delta Z_n}{K(\theta)_n} + \frac{\Delta Z_{n+1}}{K(\theta)_{n+1}}}{\frac{\Delta Z_n}{K(\theta)_n} + \frac{\Delta Z_{n+1}}{K(\theta)_{n+1}}} \quad \dots (6)$$

土壌表面における降雨・蒸発条件の導入は、次のようにして行なう。

$$(a) \theta_1 < \theta_{sat.} \text{ のとき } \theta_{1,t+\Delta t} = - \frac{\Delta t}{\Delta z} [q_{2,1} - R] + \theta_{1,t} \quad \dots (7)$$

ここで、 θ_1 : 表面下1層の土壌水分量, $\theta_{sat.}$: 飽和土壌水分量, $q_{2,1}$: 1層から2層への土壌水分移動量, R : $R \geq 0$ のとき降雨強度, $R < 0$ のとき蒸発強度。 図3. soil suction head ~ 土壌水分

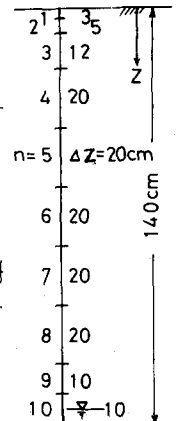
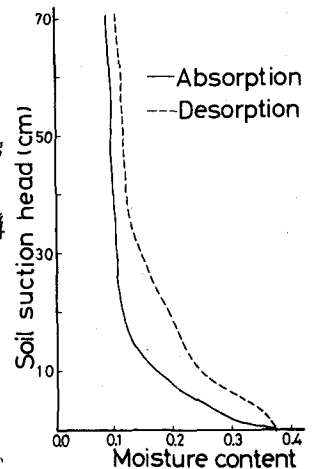


図2 土壌水分解析領域



ただし、 $\theta_i < \theta_{air}$ (気乾状態の土壤水分量) では、地表蒸発は極度に減少すると言われていることを考慮して、(8)式により蒸発するものとした。

$$R = -K(\theta) \quad \dots\dots(8)$$

$$(b) \theta_i \geq \theta_{sat.} \text{ のとき } \theta_i|_{t+\Delta t} = \theta_{sat.} \quad \dots\dots(9)$$

この場合には表面流が生起するが、表面流出量 Q_{sur} は流量の連続性より(10)式で計算できる。

$$Q_{sur} = R - \left\{ q_{i,2} + \left(\frac{\theta_{t+\Delta t} - \theta_t}{\Delta t} \right) \cdot \Delta z_i \right\} \quad \dots\dots(10)$$

計算手順としては、各領域の土壤水分量の θ の近似値に Δt 前の値を用い (i) 図3に示す suction head- θ 曲線より各区分の ψ を求める。(ii) 条件式(6)を考慮して、(4)式を用い各 $q_{n,n-1}$ を求める。(iii) 境界条件(7)-(9)の下に(5)式を用いて新しく $\theta_{t+\Delta t}$ を計算する。全区間について (i)-(iii) の計算を繰返し行ない、希望する精度の解を得た後、 Δt 時間進め、この計算を継続する。なお $\theta_{t+\Delta t}$ 値が収束した後、不飽和帯から飽和帯への供給量

$$EE_{t+\Delta t} \text{ は (11) 式により計算する。 } EE_{t+\Delta t} = \sum_{n=1}^{n=N} \left\{ (\theta_n - \theta_{t+\Delta t}) \cdot \Delta z_n / \Delta t \right\} + R \quad \dots\dots(11)$$

ここで R : 表面からの浸入量。

(ii) 地下水流動の解析 地下水流動の解析には(12)式を用いる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{KH_0}{\lambda} \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{EE(t)}{\lambda} \quad \dots\dots(12)$$

H_0 : weighted mean depth. なお地下水流動量は(13)式を用いて計算する。

$$Q_g = B \times \left[\sum_{x=0}^{x=X} (h_x - h_{t+\Delta t}) \frac{\Delta x}{\Delta t} \right] + EE(t) \times X \quad \dots\dots(13)$$

B : ライシメータの中、 X : ライシメータの長さ

3. 適用例と考察 図3, 4に示す実験より得た soil suction headと土壤水分との関係 (この計算では吸収過程の曲線を採用), および透水係数と土壤水分との関係を用いて、1971年

8月29日より11月15日までの計算結果を図5, 6に示す。この計算結果は、まだ定量的には再現性は十分ではないが、定性的にはかなり観測値を説明しているといえる。今後乾燥状態の土壤水分と蒸発量の推定値の改善、土壌表面構造の変化の影響の定量的評価、および図3の吸収・排水過程の soil suction headと土壤水分の関係にみられるようなヒステリシス現象についての検討を加えることにより、適用性を高めうるものと考えている。

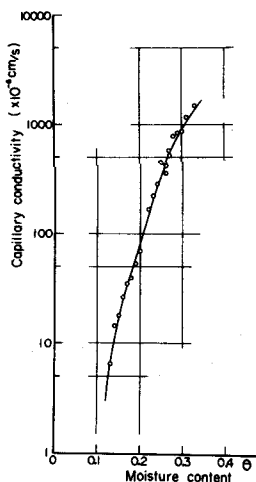


図4 透水係数~土壤水分

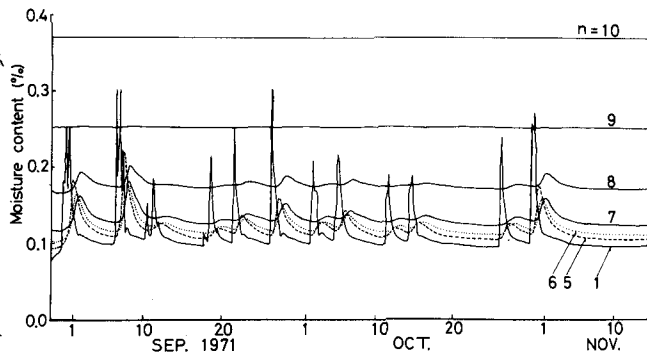


図5 土壤水分の変化 (計算結果)

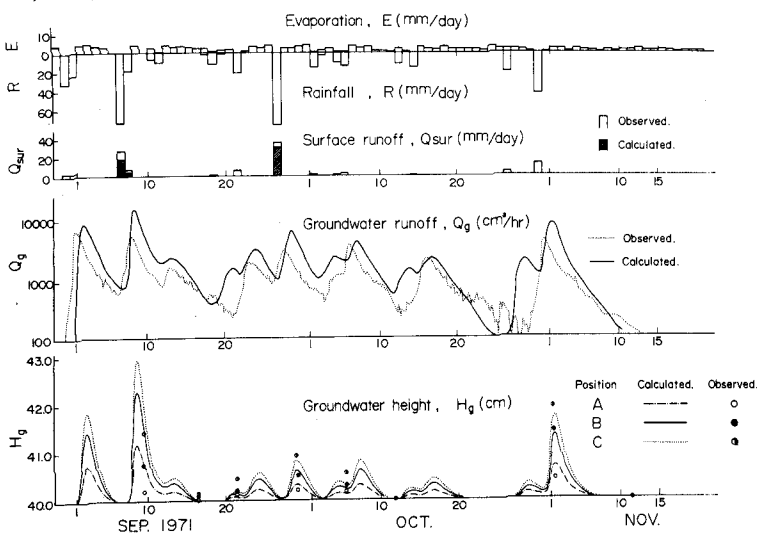


図6 観測結果と計算結果