

京都大学大学院 学生員 張 昇平
 京都大学工学部 正 員 高 棹 琢 馬
 京都大学工学部 正 員 椎 葉 充 晴

1. 概要 斜面流出過程における表面流出系と地中流出系との関係は、従来無視されたかまたは概念的にのみとらえられることが多かった。そこで本研究では、この過程を物理学・水理学的な側面から明らかにし、より客観的にとらえることを目的として、表面流と地中流を統一的に取り扱う数値シミュレーションモデルを構成し、斜面系の流出機構を分析することを試みた。

2. 数学モデルとその解法 流れの領域として、図1に示した二次元鉛直断面内の領域ABCDEFGHAを設定する。領域全体は地表面BHを共有境界とする表面流領域ABHAと地中流領域BCDEFGHBとの二つの部分領域からなる。また、地中領域は飽和領域BCDEHBと不飽和領域HEFGHの双方を含む。数学モデルは Darcy則をもとに導かれた飽和不飽和浸透流基礎方程式(1)とKinematic Wave理論に基づく表面流の運動学的近似式(6)(7)との連立解として構成されて

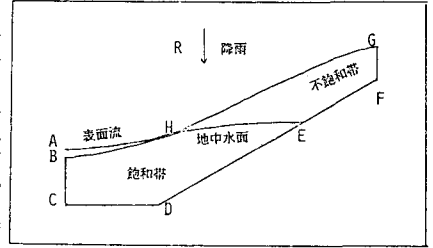


図1 モデルの流れの領域

いる。とくに表面流基礎方程式は、質量保存則のみならず、地表面での表面流流速と地中流流速との連続性をも考慮したうえで得られたものである。ここに、 h は圧力水頭、 x_1, x_2 はそれぞれ水平方向と鉛直方向の座標、 k_{ij} は透水係数テンソルの成分、 c は比水分容量、 w は含水率、 n は空隙率、 s_s は比貯留率、 t は時間、 $h_0(x_1, x_2)$ は既知関数、 m は境界曲線の外向きの単位法線、 R は降雨強度、 I は地表面を通して浸透または浸出する強度、 θ は地表面と x_1 がなす角度、 $h_d(x_1, x_2, t)$

$$\text{地中流支配方程式: } \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 k_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial}{\partial x_i} (h + x_2) \right] = (c + \frac{w}{n} s_s) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

$$\text{初期条件: } h(x_1, x_2, t) \big|_{t=0} = h_0(x_1, x_2) \quad (2)$$

$$\text{境界条件: } \frac{\partial}{\partial x_2} (h + x_2) \big|_{r_1} = 0 \quad r_1: \text{不透水境界 CDEFG} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 k_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{h + x_2}{\cos(m, x_1)} \right) \big|_{r_2} = Q(x_1, x_2, t) \quad (4)$$

$$\text{ただし } Q = \begin{cases} R \cos \theta, & h < 0 \\ I \cos \theta, & h > 0 \end{cases} \quad r_2: \text{Neumann Boundary BHG}$$

$$h(x_1, x_2, t) \big|_{r_2} = h_0(x_1, x_2, t) \quad r_2: \text{Dirichlet Boundary BC} \quad (5)$$

$$\text{表面流連続方程式: } \frac{\partial h}{\partial t} \cos^2 \theta + \frac{\partial}{\partial s} (u h \cos^2 \theta) = (R - I) \cos \theta \quad (6)$$

$$\text{表面流運動方程式: } u = F \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right)^{1/3} \quad (7)$$

$$\text{ただし } F = \frac{\alpha}{n_0} \sqrt{ \left| \sin \theta - \frac{\partial h}{\partial s} \cos^2 \theta \right| (\cos \theta)^{4/3} }$$

$$\alpha = \begin{cases} 1, & \sin \theta \geq \frac{\partial h}{\partial s} \cos^2 \theta \\ -1, & \frac{\partial h}{\partial s} \cos^2 \theta > \sin \theta \end{cases}$$

$$\text{初期条件: } h(s, t) \big|_{t=0, s \in BH} = h_0(x_1, x_2) \big|_{(x_1, x_2) \in BH} \quad (8)$$

$$\text{境界条件: } h(s, t) \big|_N = 0 \quad (9)$$

$$h(s, t) \big|_B = h_0(x_1, x_2, t) \big|_{(x_1, x_2) \in B} \quad (10)$$

θ は地表面と x_1 がなす角度、 $h_d(x_1, x_2, t)$ は既知関数、 s は地表面に沿う下流向き曲線座標、 n_0 は Manningの地表面粗度係数である。表面流と地中流の条件式はもちろんそれぞれ矛盾するものであってはならない。初期条件は本研究では、定常問題を解くことによって与えている。

連立偏微分方程式系の数値解析はGalerkin有限要素法によるものである。まず地中領域全体を適当な三角形要素に分割し、地中流基礎方程式にGalerkin基準を適用して定式化する。これによって地表面は線要素に区分される。これに対して、地中流と同様に表面流基礎方程式にGalerkin基準を適用して定式化する。そして表面流と地中流とを連立することにより地表面を通して浸透(浸出)する強度 I を消去する。こうして得られた連立常微分方程式をその時間微分項を中央差分近似して解き、全領域にわたっての圧力水頭が求められる。問題が非線形であるため、解の精度を良くする目的で許容誤差に達するまで反復計算をする。最終的に得られた圧力水頭をもとの方程式に代入して

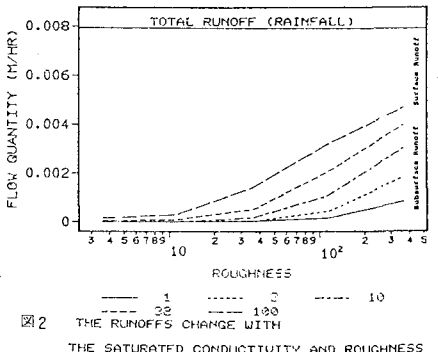


図2 THE RUNOFFS CHANGE WITH THE SATURATED CONDUCTIVITY AND ROUGHNESS

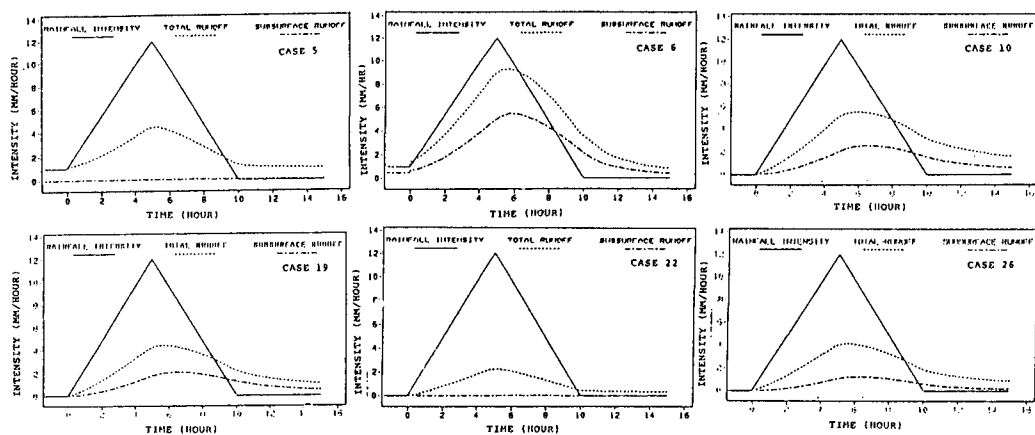


図3 Hydrograph

地表面を通しての浸透（浸出）強度が得られる。また圧力水頭の分布から、表面流と地中流それぞれの流出成分・ハイドログラフ・流出率・土壤水分量・飽和度・地中水面の深さ・浸出点の位置・表面流水深と流速・地中流流速などといった内部変数の時間的・空間的状态を知ることができる。以下では、透水係数が降雨流出に及ぼす影響について検討した結果を紹介する。

3. 透水係数が降雨流出に及ぼす影響について 図2は定常流の場合8mm/hrの降雨が透水係数と粗度係数の変化により表面流出と地中流出とにどのような割合で分配されて流出するかを示している。粗度係数が小さい場合には、抵抗の大きい地表面に復帰するよりも地中流として流出している。図3には、各Caseのハイドログラフが示してある。Case6は透水係数がCase5の100倍で、ほかのすべての条件がCase5と同じである。流出量の変化を見るとCase5では地中からの流出はほとんど認められない。しかしCase6では、地中流流出の増加に伴い総流出量が大幅に増加している。表面流流出量を比較するとほぼ横這い状態である。これはCase5・6の場合、粗度係数が大きくて復帰流が抑制されるからであると考えられる。またピーク流量の出現時刻を見ると、Case5の場合は降雨ピークから20分前後遅れているのに対し、Case6の場合は地中流出が総流出に占める割合が高くなるにつれて、ピーク流量の出現時刻はさらに20-25分遅れている。

土壤構造による非等方性が流出に与える影響を考察するため、飽和透水係数の異方性を考えてシミュレートしたのはCase10・19・22である。Case10は普通の等方性の土壤で、 $K_x=K_z=50\text{mm/hr}$ 、Case19は $K_x=50\text{mm/hr}$ 、 $K_z=1\text{mm/hr}$ 、Case22は $K_x=1\text{mm/hr}$ 、 $K_z=50\text{mm/hr}$ である。ハイドログラフからわかるように、地表流地中流流出ともにCase10>Case19>Case22という大小関係にある。また15時間後の総流出量は、Case10では総降雨量の77%、Case19では同じく58%、Case22では同じく24%であって、異方性が降雨流出に与える影響が極めて大きいことがわかる。またこの三つの例では、降雨流出に与える影響は鉛直方向の透水係数よりも水平方向の透水係数の方が大きい。斜面土壤層が厚くなれば鉛直方向の透水係数による影響も大きくなるであろう。

山腹斜面土壤構造のもう一つの特徴は成層性である。透水係数が異なる二層の土壤を持つ領域における流出現象をCase26とCase28とを比較して考察してみた。Case26は透水係数が上層で50mm/hr、下層で1mm/hrであって、Case28はその逆である。ハイドログラフを見ると総流出量ではCase26がCase28をやや上回っている。また表面流出と地中流出の配分を見ると、上層の透水係数が大きいCase26では表面流出が多く、下層の透水係数が大きいCase28では地中流流出が多い、ということがほぼ全計算時間において言えるようである。またCase28の地中流流出のハイドログラフはピークが判然としておらず、流出量も長時間に渡って高流量を示している。この理由は、難透水層である上層を透過したのちに下層からおもに流出し、復帰流として地表に浸出することも妨げられているからであろう。