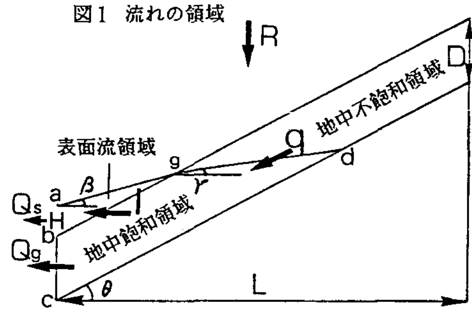
表面流・飽和流・不飽和流を統合した斜面流出モデル

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
京都大学大学院　学生員　○張　昇平　　京都大学工学部　学生員　　杉本正人

1．概要　本研究では、高棹・椎葉・張(1985)が既に提案している有限要素法による表面流・地中流を統合した斜面流出モデル[1)]（以後有限要素法モデルと呼ぶ）を集中化して、より簡略な斜面流出モデルを作成した。ここで、その結果の一部を報告する。

2．集中化モデルとその解法　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abcdefgaを設定する。abgaは表面流れの領域であり、bcdefgb は地中流れの流域である。境界cdefは不透水境界と仮定する。斜面の大きさと形状を決定する量はD, θ, Lで、D は透水層の厚さであり、θは斜面の傾き、L は斜面の水平距離である。表面流の水面および地中の飽和水面は有限要素法モデルによる解析結果より直線状と仮定しても問題がないと思われる。未知変数としてH, β, γを考え領域を決定する。Hは表面流の下流端水深、βは表面流の水面勾配、γは地中の飽和水面勾配である。以上の仮定によって領域を表面流領域abga、地中飽和領域bcdgb 、地中不飽和領域gedfg の三領域に分割する。なお、g は表面流の浸出点、l_1は表面流領域の水平長、Lg は地中水面長であり、l_2はその水平長さである。各領域間を移動する流量として、q, I, Qs, Qgを仮定する。q は不飽和帯から飽和帯への単位時間あたりの総流出量、I は飽和帯から表面流領域への総流出量、Qs, Qg は単位時間あたりの総表面流出量および総地中流出量である。表面流・地中飽和流・地中不飽和流の流れの連続関係を以下に示す。式(1) は表面流の連続関係であり、Ssは表面流領域の貯水量、Rは降雨強度、t は時間である。式(2) は地中飽和流の連続関係で、Sgは地中飽和帯の貯水量、ξは地中飽和帯が増大（減少）するときその増大（減少）する部分にもともとあった（残った）貯水量である。ξは二階以上の微分項を無視して近似計算するとdH/dt, dβ/dt, dγ/dt によって式(4) のように表

図1　流れの領域



$$dSs/dt = R \cdot l_1 + I - Qs \tag{1}$$

$$dSg/dt = \xi + q - I - Qg \tag{2}$$

$$dSu/dt = R \cdot (L - l_1) - q - \xi \tag{3}$$

$$\xi = CsLg \left[\frac{\sin(\theta-\gamma)}{\cos\theta(\tan\theta-\tan\beta)} \cdot \frac{dH}{dt} + \frac{H\sin(\theta-\gamma)\cos^2\beta}{\cos\theta(\tan\theta-\tan\beta)^2} \cdot \frac{d\beta}{dt} + \frac{Lg}{2} \cdot \frac{d\gamma}{dt} \right] \tag{4}$$

$$W = (Cs - Wr)(1 + \psi/\psi_0) \times \exp(-\psi/\psi_0) + Wr \tag{5}$$

$$Qs = (1/n_0\sqrt{|\sin\theta - \partial H/\partial S|/\cos\theta} + Vg) \times H^{3/5}/(\cos\theta)^{2/3} \tag{6}$$

$$q = 1/4\ K\ Lg^2 \sin\gamma\,(1-\alpha) \times \exp(\sin\gamma/\sin(\theta-\gamma))/L \tag{7}$$

$$Qg = 1/8\ K\ D\sin\theta\sin\gamma\,(1+\sin\beta) \times (\sin\theta+\sin\gamma)(1-\alpha) \times \exp(-2\sqrt{\sin\gamma/\sin(\theta-\gamma)}) \tag{8}$$

ただし、αは流出率である。

Takuma TAKASAO,　Michiharu SHIIBA,　ZHANG Shengping,　Masahito SUGIMOTO

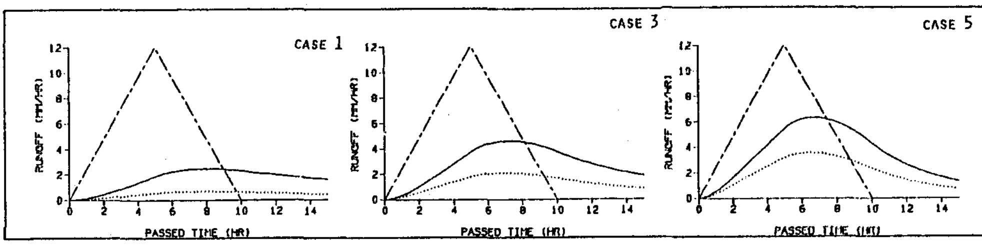


図2 計算例

すことができる。ここでCsは土壌の間隙率である。(3) は地中不飽和帯の連続関係であり、Suは地中不飽和帯の貯水量、$(L-1_1)$は地中不飽和帯の水平長である。表面流領域の貯水量(Ss)は表面流領域の面積であり、地中飽和帯の貯水量(Sg)は地中飽和帯面積×土壌の間隙率(Cs)で求まる。不飽和帯の貯水量(Su)を求めるには、不飽和帯の土壌の水分保持特性を知る必要があるが、当モデルにおいては式(5) に示す含水率曲線を用いる。ここでWrは移動可能な水がほとんどないとみなせる含水率、ψは圧力水頭、ψ_0は比水分容量〔$C(\psi)=\partial W/\partial \psi$〕が最大値を与える圧力水頭で含水率曲線の形状を決定する基準値である。有限要素法モデルによる数値実験の結果によれば、透水係数の大きい山腹斜面表層の場合、圧力水頭は式($\psi=\alpha h$) のように地中水面からの鉛直距離に比例すると近似することができる。αは比例定数で、透水係数が十分大きい場合($\alpha \fallingdotseq -1$)としてよく、h は地中水面からの高さである。以上の仮定によって含水率曲線はhのみの関数になりこの曲線を用いて地中飽和帯に関し面積積分するとSuが求まる。こうして求めたSs,Sg,Suを時間微分するとdSs/dt,dSg/dt,dSu/dtをdH/dt, $d\beta/dt$, $d\gamma/dt$ で表すことができる。q,Qs,Qg の運動方程式については、有限要素法モデルによる解析結果をもとにしてすべて(H,β, γ) の関数として導くことが必要である。いろいろな式を考えた結果今回は式(6) ～(8) に示した運動方程式が比較的良く適合していると思われた。I は地中飽和帯から表面流領域への流出量であるが、地中流はダルシー則、表面流はマニング則を基本とする運動方程式となるのでIを表す式を直接求めるのは難かしい。そこで、この連立方程式の解法は境界条件としてHとdH/dt を与えることによって式(1) と(2) を加えI を消去した2元連立常微分方程式を解き、I はその結果から逆算して求めるという方法をとった。この2元連立1階常微分方程式を解くことによって降雨強度を与えれば、時々刻々のβ, γが求められる。また、そのβ, γによってq,I,Qs,Qgの時間変化のグラフを得ることができる。

3．集中化モデルによる数値実験結果　透水係数、粗度係数等のパラメータの変化が流出に及ぼす影響を調べるため種々の数値実験を行った。図2のCASE1,3,5 は透水係数を20,40,60(m/hr)としたときの計算例で、透水係数の増大にともなって表面流出、地中流出が共に増大している。粗度係数の変化が流出に及ぼす影響は透水係数の場合に比べるとずっと小さくなっている。これは、表面流領域が常に小さいことから理解できる、これに対して不飽和帯は常に斜面の大部分を占めており、不飽和帯の水分保持特性を変化させると流出に大きく影響することも分かった。

参考文献

1)高棹・椎葉・張：表面流・地中流を統合した数学モデルによる斜面流出解析, 土木学会年次学術講演会概要集, Ⅱ－29, 1985