II-47　表面流・飽和不飽和流を統合した斜面流出モデル（II）

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
香　川　県　正　員　杉本正人

１．概要　張・高棹・椎葉・杉本(1986)[1]は、すでに有限要素法による表面流・地中飽和流・地中不飽和流を統合した斜面流出モデル[2]（以後有限要素法モデルとよぶ）を集中化して、より簡略な斜面流出モデルを提案している。本研究では、集中化モデルのパラメーターの安定性についてさらに検討を加えた。

２．集中化モデル[1]　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。境界cdefは不透水境界と仮定する。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。なお、l_1は表面流領域の水平長、L_gは地中水面長である。その他の符号は図１を参照されたい。表面流・地中飽和流・地中不飽和流の流れの連続式はそれぞれ(1)、(2)、(3)式である。Rは降雨強度、tは時間、S_s・S_g・S_uはそれぞれ表面流域・地中飽和流域・地中不飽和流域の貯水量、ξは地中飽和帯が増大（減少）する部分にもともとあった（残った）貯水量、C_sは土壌の間隙率、W_rは移動可能な水がほとんどないと見なせる含水率である。なお、不飽和帯の水分保持特性曲線は谷(1982)[3]によるものである。(1)、(2)、(3)式について時間微分すると、dS_s/dt・dS_g/dt・dS_u/dtをdH/dt・$d\beta/dt$・$d\gamma/dt$で表すことが出来る。q、Q_s、Q_g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）の関数として導く必要がある。

有限要素法モデルにおいて、表面流は斜面方向の一次元流れとして取り扱われ、本研究での考えかたもまったく同じものであるから、Q_sの表現式(5)はそのまま使える。n_0は粗度係数である。V_gは下流端地表面での地中流流速で、ダルシー則に基づいて求められる。qとQ_gについて本研究では、貯留関数法の考えかたをもとにしてq、Q_gと貯水量との関係を調べてみることにする。

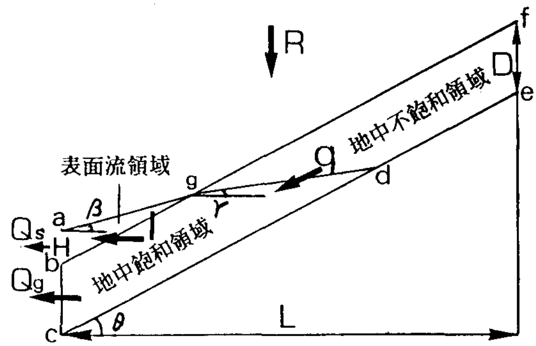

図１　流れの領域

$$dS_s/dt = R\cdot l_1 + l - Q_s \quad (1)$$

$$dS_g/dt = \xi + q - l - Q_g \quad (2)$$

$$dS_u/dt = R\cdot(L - l_1) - q - \xi \quad (3)$$

$$\xi = C_s\cdot L_g\left\{\cos\gamma + \frac{\tan\theta - \tan\gamma}{\cos\gamma(\tan\theta - \tan\beta)}\right\}\frac{dH}{dt} + C_s\cdot L_g\,\frac{H(\tan\theta - \tan\gamma)}{\cos\gamma\cos^2\beta(\tan\theta - \tan\beta)^2}\cdot\frac{d\beta}{dt} + (C_s/2 - W_r)L_g\cdot d\gamma/dt \quad (4)$$

$$Q_s = H\cos\theta\left\{\frac{1}{n_0}\sqrt{\tan\beta\cdot\tan\theta}\left(\frac{H}{\cos\theta}\right)^{2/3} + V_g\right\} \quad (5)$$

$$q = A_q\{(S_u - S_{u0}) + (S_g - S_{g0})\}^{B_q} \quad (6)$$

$$Q_g = A_{Qg}\{(S_u - S_{u0}) + (S_g - S_{g0})\}^{B_{Qg}} \quad (7)$$

３．パラメーターの安定性　流域条件を固定し（詳しいことは講演会で報告する）、三角形降雨（継続時間は10時間で、ピークは５時間のときである）について有限要素法モデルによる解析結果を使ってまず調べた。その結果、(6)、(7)式に示した流量式がよく適合しているように思われた。パラメーターの値はA_q＝0.46250、B_q＝0.77260、A_{Qg}＝0.43609、B_{Qg}＝0.77133である。ただし、S_{g0}は静止状態すなわち表面流水面、地中飽和流水面がともに水平なときの地中飽和領域の貯水量、S_{u0}は静止状態の地中不飽和領

域の貯水量である。図２にはピーク降雨量が６㎜のときのｑ、Q_g と貯水量との回帰曲線を示している。相関係数 R_{XY}は0.96以上であるから、両方がかなり強い相関関係にあると言える。同じように、ピーク降雨量が1 、3 、12、24㎜の場合についても A_q 、B_q 、A_{Qg}、B_{Qg}を求めた（ X軸方向の回帰曲線の値を用いる）。その結果を図３にまとめて示している。図３からわかるように、同じ流域に対して、降雨強度が大きく変化しているにもかかわらず流量式(6) 、(7) のパラメータ A_q 、B_q 、A_{Qg}、B_{Qg}の値がほぼ安定している。降雨強度が小さいときはその値が多少変化しているが、それは流量が小さく、それと比べて数値計算の誤差が相対的に大きいためだと思われる。式(6) 、(7) のパラメータ A_q 、B_q 、A_{Qg}、B_{Qg}は上述の各ケースの計算結果を相関係数を重みとして平均して得られたものを用いることにした。図４はこれらの値を用いてピーク降雨量が12㎜の場合をシミュレートした結果と有限要素法モデルによる解析結果とを比較したものである。両方がよく一致していると言えよう。同じパラメータを使って降雨強度が12㎜で、継続時間が５時間の矩形降雨の場合をシミュレートした結果を示したのは図５である。図５からわかるように、流域条件および初期条件が固定していれば流量式(6)、(7) のパラメーター A_q 、B_q 、A_{Qg}、B_{Qg}は降雨強度および降雨パターンと関係なく安定している。

４．おわりに　以上のように表面流・地中飽和流・地中不飽和流を統合した有限要素法モデルを集中化して構成したより簡略な斜面流出モデルは、有限要素法モデルと同様に表面流出系と地中流出系との関係、さらに不飽和領域流れと飽和領域流れとの関係を考慮している。また、有限要素法モデルと異なり、多大な計算時間を必要としないので、より実用的なモデルとなった。実流域における流量の観測データを用いて流量式のパラメータを同定することおよびこれらのパラメーターと流域特性との関係を解明することが今後の課題として残る。

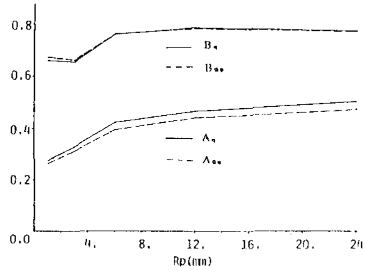

図３．三角形降雨のピーク雨量と流量式のパラメーター

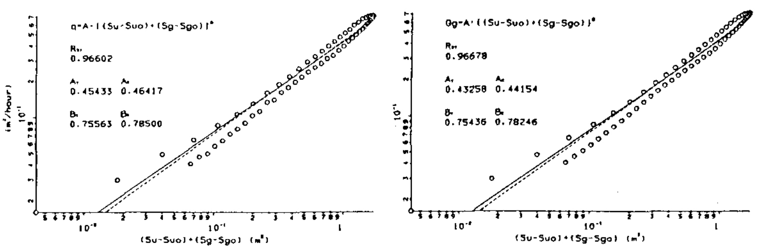

図２．三角形降雨(ピーク雨量6㎜)の場合の流量と貯水量との関係

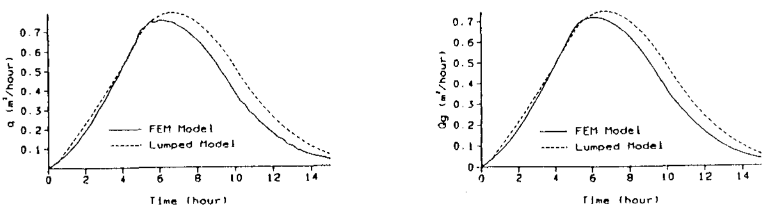

図４．集中化モデルと有限要素法モデルによる流量の比較

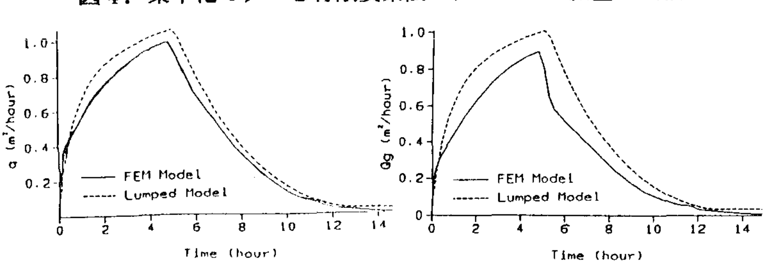

図５．三角形降雨で同定パラメーターを用いて矩形降雨の場合をシミュレートした結果

参考文献1)張　昇平・高棹琢馬・椎葉充晴・杉本正人：表面流・飽和不飽和流を統合した斜面流出モデル、土木学会第41回年次学術講演会, Ⅱ-23,1986.　2) 高棹琢馬・椎葉充晴・張　昇平：表面流, 飽和・不飽和地中流相互干渉機構の分析モデル, 京都大学防災研究所年報, 第29号Ｂ-2,pp.253-269,1986.　3)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, Vol.64,No.11,pp.409-418,1982.