

日本鋼管株式会社 正会員 出雲 秀治
東京工業大学 正会員 日野 幹雄
建設省土木研究所 正会員 藤田 光一

1. はじめに 降雨流出関係を考える上で、表層土壌の雨水損失量および雨水が流出するまでの時間（雨水到達時間）は、流出現象に大きな影響を及ぼす。日野¹⁾²⁾らは、表層土壌の水分移動に関する実験と不飽和浸透理論に基づく鉛直一次元解析を行った。その結果、実験と解析とがほぼ一致し、鉛直一次元解析の基本方程式の有効性が明らかになった。本研究では、実験および実験に対応した解析だけでは言及することのできない、表層土壌の一般的な降雨流出特性を明らかにすることを目的として、不飽和浸透理論に基づく鉛直一次元解析を行った。

2. 基本方程式・計算条件およびその無次元化 実際の表層土壌は、様々な土層の厚さや土の性質をもっており、それぞれ全ての場合について解析を行うのは困難であるので、適当なパラメータを用いて無次元化を行い、式中のパラメータを減らして解析を行った。ただし、土壌表面からの蒸発散の効果および植生の効果はないとした。また、図1のように地下水面を深さLに固定し、雨水が到達すればすぐに流出するとした。ところで、鉛直一次元解析の基本方程式および境界条件を以下に示す。鉛直軸Zは土層表面から下向きを正とする。

基本方程式 $\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \frac{dK(\theta)}{d\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}$ t : 時間
 θ : 体積含水率

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\phi - \theta_r} \right)^{2\lambda} \quad D(\theta) = D_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\phi - \theta_r} \right)^{1+2\lambda}$$

K_s : 飽和透水係数 D_s : 飽和拡散係数 λ : 定数
 θ_r : 最小体積含水率 ϕ : 飽和体積含水率

境界条件 $z=0 \quad g = K(\theta) - D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} = R$ (降雨強度)
 $z=L \quad \theta = \phi$ (飽和体積含水率)

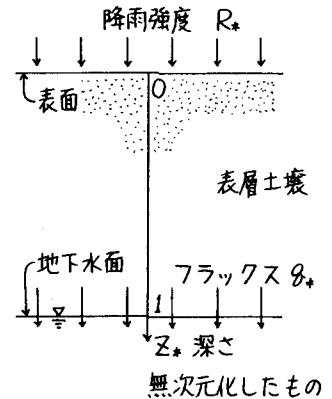


図1 鉛直一次元解析

無次元化

$$Z_* = \frac{z}{L} \quad \Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\phi - \theta_r} \quad g_* = \frac{g}{K_s} \quad t_* = \frac{t}{\left\{ \frac{L(\phi - \theta_r)}{K_s} \right\}}$$

$$\beta_1 = (2 + 3\lambda) / \lambda \quad h(\Theta) = \Theta^{\beta_1} \quad \beta_2 = (1 + 2\lambda) / \lambda \quad d(\Theta) = \Theta^{\beta_2} \quad \Rightarrow \quad K(\Theta) = K_s h(\Theta) \quad D(\Theta) = D_s d(\Theta)$$

基本方程式 $\frac{\partial \Theta}{\partial t_*} = \frac{\partial}{\partial Z_*} \left[d(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial Z_*} \right] - \alpha \frac{dh(\Theta)}{d\Theta} \frac{\partial \Theta}{\partial Z_*}$ ただし $\alpha = \frac{D_s(\phi - \theta_r)}{K_s L}$

境界条件 $Z_* = 0 \quad g_* = h(\Theta) - \alpha d(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial Z_*} = R_*$
 $Z_* = 1 \quad \Theta = 1$

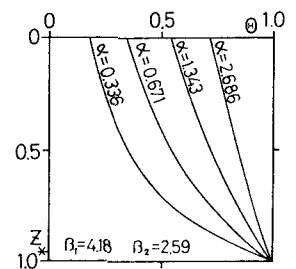


図2 平衡状態水分量分布

また初期水分量分布を、土層各深さでフラックス $g_* = h(\Theta) - \alpha d(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial Z_*} = 0$ の平衡状態の分布とする。(図2) 以上の無次元化と初期条件設定により、パラメータは $\alpha \cdot \beta$ (β_1, β_2) $\cdot R_*$ の3つとなる。 α が小さい場合は、地下水面が深い・ K_s が大きい・ D_s が小さいなどの場合に相当する。 β は $h(\Theta)$ や $d(\Theta)$ の関数形を表し、 R_* は降雨強度と降雨継続時間によって決まる降雨波形を表す。これらのうちで、降雨波形が最も重要であると考えられる。なお、差分計算により基本方程式の数値解を求めた。

3. 解析結果 本解析では、降雨継続時間を变化させた場合の流出形態の違いを明らかにすることを目的とした。また同時に、 α や β を变化させ、それが流出形態に及ぼす影響についても考えた。降雨継続時間は、降雨開始

からの累積降雨量が平衡状態の空隙の量に等しくなるまでの時間を基準として考えた。(A)降雨継続時間の長い場合；図3に、降雨強度 $R_0=1$ 継続時間 $t_0=1$ の場合の地下水面でのフラックスの時間変化を示す。このような場合、時間経過に伴ない、 q_* は増加し、一定となり、降雨停止後減少している。また、立ち上がりの傾きは α によらずほぼ一定である。しかし、流出開始までの時間は α によって異なる。なお、 β を変化させても、立ち上がりの傾きが変わるだけで、流出開始までの時間にはほとんど影響しないことも確認された。したがって、雨水到達時間は α によってほぼ決まると言えよう。図4には

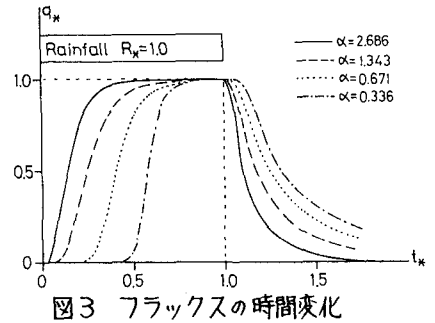


図3 フラックスの時間変化

①計算による到達時間($q_*=0.5$ になる時間)と α の関係、②累積降雨量が平衡状態の空隙量に等しくなる時間と α の関係を示す。両者がほぼ一致していることから、到達時間は、 α により変化する初期水分量によって決まると言えよう。また、雨水損失量は、総降雨量が一定なので、ハイドログラフの下の方により決まる。図3より α が小さいほど損失量は大きく、降雨波形に対する流出波形の変化が大きいくことになる。(b)降雨継続時間の短い場合；図5に $R_0=1$ として継続時間 t_0 を変化させた場合のハイドログラフを示す。①は図3の $\alpha=0.671$ である。継続時間の短い②③の場合は、グラフのピーク時刻およびフラックスは継続時間によって異なるが、ピークに至るまでのグラフの形状は①のグラフに一致する。これは、ハイドログラフの形状が、基本的には立ち上がりの形状で決まることを意味する。そして、雨水到達時間は(A)の場合と同様に考えることができよう。(C)降雨継続時間の特に短い場合；図5の④のように、継続時間 t_0 が特に短い場合は、②や③と異なり、継続時間の違いがハイドログラフの形状にあまり影響を及ぼさない。図6に、このような場合について、①～④の4種類の降雨波形を与えたときのハイドログラフを示した。

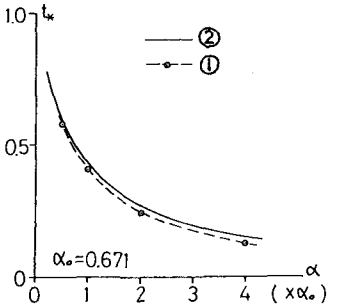


図4 到達時間と α の関係

①と②は、総降雨量 $R_0 t_0$ を一定にし、降雨波形を変えたものである。総降雨量が同じなら、降雨波形が異なっても、ハイドログラフはほぼ同じ形状を示す。③は総降雨量を2倍、④は $1/2$ 倍と変えたものである。ハイドログラフのピークの時刻は、総降雨量によってあまり変化していない。また、各時刻でのフラックスと総降雨量とは、比例に近い関係をもっている。以上の性質により、鉛直次元解析の基本方程式が非線形であるにもかかわらず、降雨継続時間が特に短い場合には、ハイドログラフの形状は、総降雨量によって線形に近い決まり方とすることが明らかになった。したがって、このような場合の雨水到達時間は、降雨波形とは無関係に、もともとの土壌の初期水分量によって決まると言えよう。

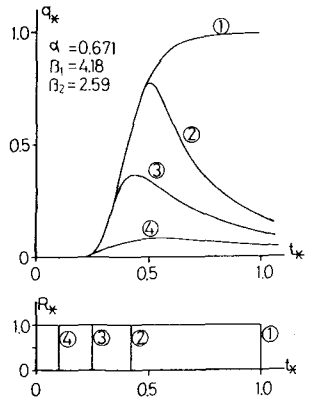


図5 ハイドログラフに与える降雨継続時間の影響

④のように、継続時間 t_0 が特に短い場合は、②や③と異なり、継続時間の違いがハイドログラフの形状にあまり影響を及ぼさない。図6に、このような場合について、①～④の4種類の降雨波形を与えたときのハイドログラフを示した。①と②は、総降雨量 $R_0 t_0$ を一定にし、降雨波形を変えたものである。総降雨量が同じなら、降雨波形が異なっても、ハイドログラフはほぼ同じ形状を示す。③は総降雨量を2倍、④は $1/2$ 倍と変えたものである。ハイドログラフのピークの時刻は、総降雨量によってあまり変化していない。また、各時刻でのフラックスと総降雨量とは、比例に近い関係をもっている。以上の性質により、鉛直次元解析の基本方程式が非線形であるにもかかわらず、降雨継続時間が特に短い場合には、ハイドログラフの形状は、総降雨量によって線形に近い決まり方とすることが明らかになった。したがって、このような場合の雨水到達時間は、降雨波形とは無関係に、もともとの土壌の初期水分量によって決まると言えよう。

4. まとめ 以上の解析結果により、表層土壌の降雨流出現象を支配するパラメータは、主として降雨波形 R_0 および流出しやすさを示す α であり、特に降雨継続時間によって、流出形態が3つのタイプに分かれることが明らかになった。

〔参考文献〕 1) 藤田・日野・出雲：表層土壌中の水分移動特性とその特性に及ぼす植生の効果，第27回水文学P415～418，1983 2) 藤田・日野・出雲：表層土壌の雨水流動に関する実験と解析，第38回水文学第2部，1983 3) 谷越：一次元鉛直不均和浸透によって生じる水面上昇の特性，日本水文学会誌，Vol.64，1982

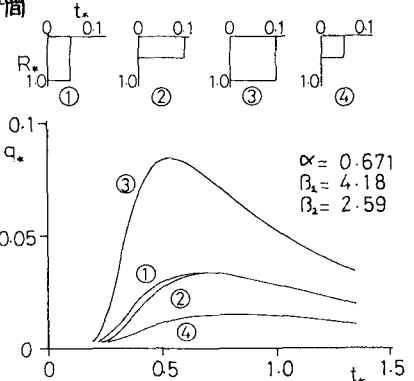


図6 フラックスの時間変化