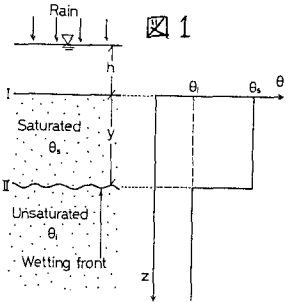


東京工業大学大学院 学生員 藤田 光一
東京工業大学工学部 正員 日野 幹雄
東京工業大学工学部 正員 山田 正

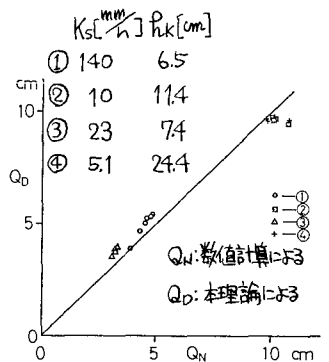
1. はじめに 土中における雨水の運動形態を物理的に解析し実際の流出現象と結びつけることは、流出モデルの合理性の向上と流出現象自体の解明にとって重要であり、最近の水文学においてもこのような流出の物理過程への関心が高まっている。本研究は、流出過程の中でも基本的と思われる降雨鉛直浸透に関して理論解析を行ない、雨水の浸透過程に対して詳細な検討を加えたものである。そしてこの解析により現象を支配するパラメータとその水文的働きを明らかにした。

2. 浸透理論 対象としたのは、降雨強度より透水係数が小さく土の表面に湛水が生じる場合の鉛直浸透である。理論解析は鉛直1次元、1相(水のみ)として土の性質と初期水分量が深さ方向に一樣である条件の下で、飽和した部分が時間と共に下方に伸長するモデル(図1)を考え、飽和ダルシー則を用いた。



$$\begin{aligned} q &= K_s \frac{y + h_k + h_l}{y} \quad \text{--- ①} & q: \text{浸透速度, } K_s: \text{飽和透水係数} \\ \frac{dh}{dt} + (Q_s - Q_i) \frac{dy}{dt} &= R \quad \text{--- ②} & h_k: \text{浸透線ごの前進毛管負圧水頭} \\ q &= (Q_s - Q_i) \frac{dy}{dt} \quad \text{--- ③} & h_l: \text{湛水深, } y: \text{飽和部分の長さ} \\ h_l(t_p) &= 0 \quad \text{--- ④} & Q_s: \text{飽和時の単位体積当たりの水分量} \\ q(t_p) &= R \quad \text{--- ⑤} & Q_i: \text{単位体積当たりの初期水分量} \\ & & R: \text{降雨強度, } t_p: \text{湛水が発生する時間} \end{aligned}$$

図2 累積浸透量の数値計算結果との比較



①式は図1のIとIIの間にダルシー則を適用することにより、②③式は連続条件から導かれる。基本式である①~③式を連立させて解くことにより $q(t)$ 、 $h_l(t)$ が求まる。④⑤式は初期条件であり湛水開始時刻において定めた。

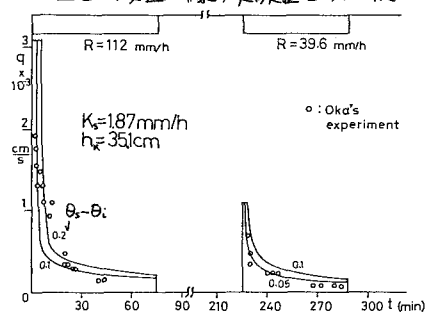
h_k を算定するには土の不飽和特性を考慮する必要がある、ここでは①⑤式より求まる q と不飽和浸透方程式により求まる q が一致する条件で h_k を決めた。

$$\text{⑥式が算定式である。} \quad \left| \begin{aligned} h_k &= \int_{-\infty}^0 \frac{K(\psi)}{K_s} d\psi \quad \text{--- ⑥} & \psi: \text{毛管負圧水頭} \\ & & K(\psi): \text{不飽和透水係数} \end{aligned} \right.$$

これにより $K(\psi)$ が測定されている土について $q(t)$ 、 $h_l(t)$ が求まる。図2は不飽和浸透理論による数値解と本理論による解を一定時間までの累積浸透量について比較したものであり、両者はよく一致している。図3は浸透曲線自体について図の実験値と比較したものであり、 $Q_s - Q_i$ が未知なので明確には言えないが両者に大きな差はないと思われる。このことから本研究で用いた h_k の算定法に基づく飽和浸透理論は現象を適切に表わしていると考えられる。また式中のパラメータの物理的意味が明確になっているところが本理論の大きな特長である。

3. 降雨鉛直浸透の性質 ①~③式をまとめ、 $q_s = q/K_s$ 、 $t_s = t/\{(Q_s - Q_i)h_k/K_s\}$ 、 $R_s = R/K_s$ 、 $h_{ks} = h_l/h_k$ により無次元化したのが⑦⑧式であり、現象が R_s と $Q_s - Q_i$ の2つで決定されることわかる。

図3 浸透曲線の実験値との比較



$$\frac{d\theta_s}{dt_*} = \frac{(\theta_s - 1)(R_* - \theta_s)}{R_* + 1} (\theta_s - \theta_i) - \frac{\theta_s (\theta_s - 1)^2}{R_* + 1} \quad \text{--- ⑦}$$

$$\frac{dR_*}{dt_*} = (R_* - \theta_s)(\theta_s - \theta_i) \quad \text{--- ⑧}$$

図4は R_* が変化する場合の θ_s - t_* 関係を示したもので(計算は基本式の差分計算によった), 降雨開始直後は R_* によって θ_s が大きく異なるが, t_* 以降の浸透曲線はあまり変わらず図中の破線で示した θ_s - R_* の関係で θ_s - t_* 関係を近似できると言えよう.

図5は T_R (降雨継続時間の無次元形)一定で R_* を変えた場合, 図6は R_* 一定で T_R を変えた場合の θ_s - t_* 関係を示したもので, T_R , R_* が大きくなると浸水のなくなるまでの時間の降雨時間に対する比が大きくなっており, この浸透現象は θ_s - t_* に関して水文学で言う R_* , T_R に対する非線形性を持っていることがわかる. $\theta_s - \theta_i$, 土の性質(R_* , K_s)の浸透曲線に与える影響は実数元では大きい. 図7は $\theta_s - \theta_i$ を変えた場合の浸透曲線(実数元)であり, $\theta_s - \theta_i$ が小さいと浸透速度がより早く減少することを示している. K_s の減少によっても同様の効果が見られる.

4. 損失機構についての考察

図8は, ある時間までの累積浸透量 $\Sigma \theta$ と累積降雨量 ΣR の関係をいくつかの R , T_R について示したものである. 地下水へのインフラットと直接流出の分離がこの浸透過程にあると考えれば(土の表面だけでなく土中の透水性が急に悪くなる層の所での分離も含めて考える), 図8は ΣR が増すと直接流出の割合が増大すること意味する. これは, 流出率の R , T_R に対する非線形性に対応すると思われる.

次に透水性係数 K が平面的に分布を持つ場合の $\Sigma R \sim \Sigma \theta$ 関係を考える.⁽⁶⁾ 簡単にするため浸透速度が時間的に変化せず K に等しいとして流域平均の浸透速度 $\bar{K}$ と R の関係を求めたのが⑨式である. 図9は⑨式によりいくつかの $S(K)$ について $\bar{K} \sim R$ 関係を求めたものである. $\bar{K}$, R に降雨時間をかければ $\Sigma \theta$, ΣR を表わすと考えられ, 実流域の $\Sigma \theta \sim \Sigma R$ 関係に見られるいくつかのパターンと一致したものが図9の中に見出される. このように流域

$\bar{K} = R - \int_0^R (R - K) S(K) dK$ --- ⑨
 $S(K)$: 透水性係数が K である部分の面積の割合

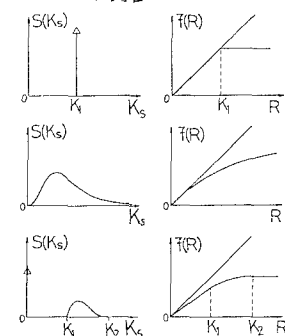


図9 $S(K)$ と $\bar{K} \sim R$ 関係との対応

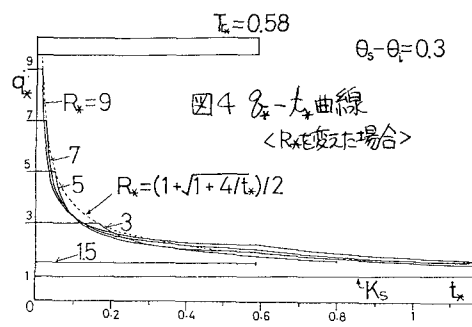


図4 θ_s - t_* 曲線
< R_* を変えた場合>

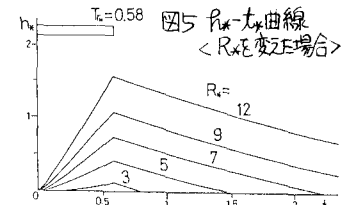


図5 R_* - t_* 曲線
< T_R を変えた場合>

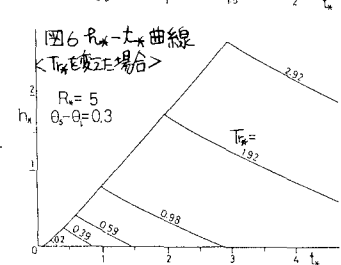


図6 R_* - t_* 曲線
< T_R を変えた場合>

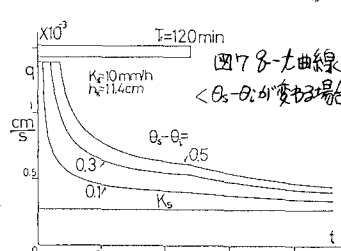


図7 θ_s - t_* 曲線
< $\theta_s - \theta_i$ が変化する場合>

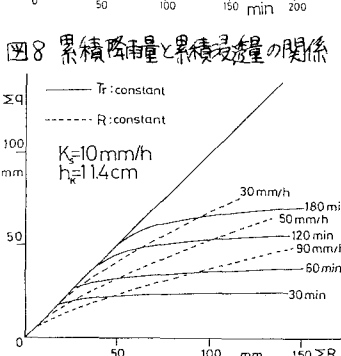


図8 累積降雨量と累積浸透量の関係

内の K が平面的に分布を持つと, それが一様である場合と比較して大きく異なる流出特性を示すことから, 流域が大きい場合には浸透速度の時間変化よりも K の平面的分布の方が重要であり, その時には $S(K)$ が流域構造を表わす指標になると思われる.

5. おわりに

本研究によって鉛直浸透を決定するパラメータが明確になり, その基本的な性質が理解された. 今後は, 他の流出過程についても理論解析を行ない流出特性と流域構造との関係を詳細に考察して行きたい. [参考文献] (1) Kirkby, M.J. (Ed.), Hillslope Hydrology, 1978 (2) 田所・日野・山田, 1980, 第35回年講II部P568-589 (3) 土壌物理研究会編, 土壌物理学 (4) 田所・日野・山田, 1980, 第35回年講II部P568-589 (5) J.T. Ballance, 1971, Soil Sci. Vol. 114, L, P1-4 (6) R. C. Linsley, 1980, J. Hydrol., Vol. 47, 91-101