

1-2 雨水の流出機構に関する一考察

広島大学 工学部 正員 金丸昭治
三島隆明
広島大学 大学院 学生員 中川信夫

石油資源を始めとして、近年、全般的に資源の有効利用の必要性が認識されつつあるが、水資源に関しては雨滴として地上に到達した雨水をいかに安全かつ効率的に滞留させて使用するかということに帰着することは周知のとおりである。著者はこれらの問題に対する施策に際し適切な指針を与えることを最終目標にして、その基礎的研究の一環として流域における雨水の流出機構について究明中であるが、本稿においては当面の利水供給と考えられる中間流出時以降の現象すなわち中間流出時および地下水流出時の現象について考察した結果を述べる。

まず流域のモデル化を行なうとともに中間流出時および地下水流出時の定義を提示する必要がある。流域のモデル化については、これまでに行なった現地流域の調査および各種の流出実験結果を総合して考えると、流域の局所的な不規則性および上下流域近傍の局所的な現象を除けば、最も一般的な流域の単純モデルとしては図-1に示すような、比較的透水性の大きい上層と、透水性の小さい下層との二層によって構成された斜面を考えるのが妥当のようである。図中の記号は、 k は透水係数、 α は有効空隙率、 C は層厚、 q は単位幅流量、 $\delta(t)$ は単位面積当りの浸透量、 h は斜面に垂直に測った水深、 x は斜面方向に取った距離、 θ は斜面勾配、また各諸量の添字の1は上層を、2は下層を表わすものとする。つぎに、各流出期の定義としては、中間流出時以降のうち、中間流出時を1期とし、地下水流出時を2期に分割して計3段階にわけて考える。すなわち、 α 1段階の中間流出時とは、上層内に自由水が存在する状態に始まり、上層からの不飽和浸透が終了するまでの時期とし、 α 2段階の地下水流出時 α 1期とは、自由水面が下層内に存在する時期とする。さらに α 3段階の地下水流出時 α 2期とは、自由水面が消失してしまって斜面全体が不飽和浸透流になった状態を表わすものとする。

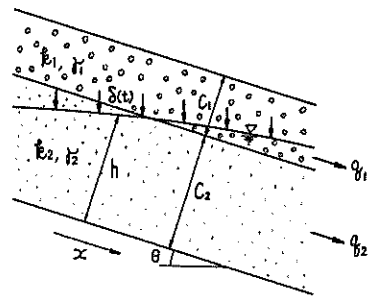


図-1 斜面モデル

図-1のようにモデル化した斜面の層内の流動がDarcy則にしたがい、しかも各種の不規則性要素によって生ずる擾乱を平均値的に取り扱うことにすれば、中間流出時および地下水流出時 α 1期における雨水流動の基礎方程式としては、それを(1)、(2)式のように表わされる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{k_1}{\alpha_1} (\sin \theta - \cos \theta) \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{1}{\alpha_1} (k_2 C_2 \cos \theta + k_1 h \cos \theta + \alpha_1 \eta) \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{1}{\alpha_1} \delta(t) \quad \text{----- (1)}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{k_2}{\alpha_2} (\sin \theta - \cos \theta) \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{1}{\alpha_2} (k_2 h \cos \theta + \alpha_2 \eta) \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{1}{\alpha_2} \delta(t) \quad \text{----- (2)}$$

ただし、 η は擾乱の拡散係数である。ところが、地下水流出時 α 2期については、不飽和水の流動法則がいまだ明確でなく、適確な把握は困難であるが、 $\delta(t)$ の取り扱い方を工夫すれば近似的にこの期間における流動の基礎式についても(2)式のような形で表現することが可能であると考えられる。以上が各期間の流動の基礎方程式であるが、(1)、(2)式の各項の係数部分および右辺 α 2項をそれぞれ表-1に示すように置きかえると(3)式のようになり、さらに $x = x - A t$ 、 $\tau = t$ および $h = h - \int_0^t R(s) ds$ のように変数変換すれば、いずれも(4)式のような熱伝導方程式を用いて統一的に表わすことができる。ただし、 A 、 B は定数扱いとする。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + A \frac{\partial h}{\partial x} = B \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + R(t) \text{ ----- (3)}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = B \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \text{ ----- (4)}$$

したがって、各断面における流出方程式は(4)式のような熱伝導方程式の解として得られるが、初期条件および境界条件として $h(0, x) = \varphi(x)$ 、 $h(x, 0) = \psi(t)$ を与えて求めた一般解ならぬに $\psi(t)$ の決定条件はそれぞれ(5)、(6)式のように表わされる。

$$h(x, t) = \frac{1}{2\sqrt{Bt}} \int_0^\infty \varphi(\xi) \left[e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4Bt}} - e^{-\frac{(x+\xi)^2}{4Bt}} \right] d\xi$$

$$+ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \psi(t_1 - \frac{x^2}{4Bt_1}) e^{-\frac{x^2}{4Bt_1}} dt_1 \quad (x \geq 0) \text{ ---- (5)}$$

$$- R(t) = \frac{1}{2\sqrt{Bt}} \int_0^\infty \varphi(\xi) \left[e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4Bt}} - e^{-\frac{(x+\xi)^2}{4Bt}} \right] d\xi$$

$$+ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \psi(t_1 - \frac{x^2}{4Bt_1}) e^{-\frac{x^2}{4Bt_1}} dt_1 \text{ ---- (6)}$$

また流量変化としては、解析の取り扱い方から考えて水深に比例すると考えた方が妥当であろう。

実際現象に適合する解を求めるためには $\varphi(x)$ 、 $\psi(t)$ もなんらかの方法で決定する必要があるが、厳密な函数形を理論的に求めることは不可能であるばかりでなく、実験あるいは実測から決定することも、不飽和浸透量などの変化を計測することの困難さを考えれば、現況のところあまり期待できない。したがって恒定せざるをえないが、定常浸透状態を考えれば、水深分布形状は浸透量などを考慮しない場合の近似分布形、 $\varphi(x) = dx^2$ で代表できようである。一方 $\psi(t)$ については(6)式の $R(t)$ を零とおいた場合でも単純な函数形にならないが、現象が移流を伴う一様減衰であることを考慮すれば近似的には $\psi(t) = 0$ と考えることが可能である。このような状態が仮定できる場合の流出変化は、すでに発表したように近似的に $q_0/q_\infty(t+1)$ のような双曲線を表わすことができる。したがって、中間流出時以降の流出変化のうち、中間流出時および地下水流出時1期についてはそれをれ独立した双曲線で表現することが可能であるが、地下水流出時2期については必ずしも双曲線変化をしない場合もあると思われる。たとえば、斜面長にくらべて層厚が極めて小さい場合には、斜面全体に発生した不飽和浸透流が不透層に沿って流下し、下流端直傍に貯留されて流出することが考えられるから指數的变化をすることも十分考えられる。現在、上述の理論の検証として山腹表層土および河砂を用いた実験を継続中であるが、図-2は実験結果の一部を示したものである。これは山腹表層土(斜面長6m、斜面幅55cm、上層厚7cm、下層厚40cm、斜面勾配1/6)を用いて図中に示すような降雨条件(r は降雨強度、 T は降雨継続時間)について屋内流出実験を行ない、単位幅流量 q を初期流量 q_0 で割ったものの逆数の時間的变化を示したものである。図からわかるように、 r が 22 mm/hr 以下の q_0/q の変化は1本の直線を表わされ、 $r > 22$ mm/hr については25時間あたりで折れた2本の直線とみなすことができる。一方、底面に流動方向に50cmおきに取り付けた1メートルを測定した水深変化を調べた結果、 $r > 20$ mm/hr の場合には降雨終了時($t=0$)においては上層部水深が下流寄り中央部($l=3m$)の巨間に分布し、 $t=25$ hr においては斜面中央部($l=4m$)を約15cm程度にまで低下していた。また、 $t=90$ hr においては斜面中央部($l=15m$)で水深が観測された。しかし、今回は実験の都合上自由水面消失後すなわち地下水流出時2期については省略した。

以上の結果より、本稿で述べたような取り扱いがかなりの適用性を持つことが明らかになった。今後実験を継続し、さらに広範な検証を行なっていく予定である。

	中間流出時	地下水流出時
A	$\frac{q_1}{q_0} (\sin \theta - \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x})$	$\frac{q_2}{q_0} (\sin \theta - \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x})$
B	$\frac{1}{q_0} (k_1 C_1 \cos \theta + k_2 h \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x})$	$\frac{1}{q_0} (k_2 h \cos \theta - h \frac{\partial h}{\partial x})$
R(t)	$\frac{1}{q_0} S(t)$	$\frac{1}{q_0} S(t)$

表-1 A, B の内容

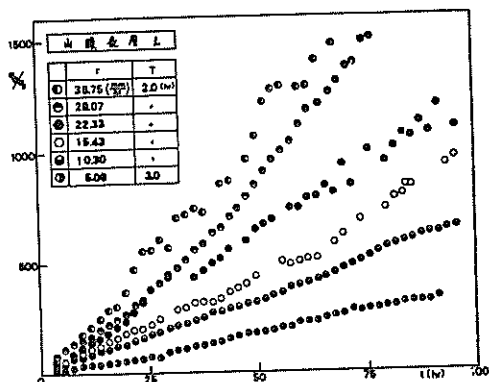


図-2 q_0/q - t 関係図