

東京工業大学大学院 学生員 尾高 義夫  
 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 難岡 知夫

1. はじめに 雨水が土壌中を地下水面まで降下浸透するとき、土壌に以前から保持されていた古い雨水は新しい雨水に置換される。この過程は、放射性同位元素をトレーサーとしたいくつかの実験によって確かめられている。このような置換作用により、流出初期においては、地表面から供給された新しい雨水に比べて土壌中に保持されていた古い雨水が流出水中に大きな割合を占めることになる。また日野らは河川流出水をフィルタ分離AR法によって成分分離することで、流出水中に通気帯水分（古い雨水）がかなり含まれていることを明らかにしている。しかしながら雨水の置換作用そのものに関する解析はなされていない。そこで本研究では雨水を古い雨水と新しい雨水に分離した型でRichardsの飽和浸透式および拡散方程式を取扱うことによって、このような置換作用を表現し得る基礎方程式系を導出し、それに基づいて数値解析を行った。またこの解析結果の妥当性を検討するために、ライツメータを用いて塩水をトレーサーとした降雨実験を行った。

## 2. 解析方法 ①基礎方程式および土壌物理条件：

一次元のRichardsの飽和浸透式(1)、および拡散方程式(2)を基礎方程式とする。ただし雨水流動において分子拡散に比べて移流の効果が卓越していると考え、(2)式では拡散項を省略している。座標は鉛直下向きを正とする。

$$C(\gamma) \frac{\partial \gamma}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(\gamma) \left( \frac{\partial \gamma}{\partial z} - 1 \right) \right\} \quad \cdots (1)$$

$$\frac{\partial (C(\theta - \theta_r))}{\partial t} + \frac{\partial \theta C}{\partial z} = 0 \quad \cdots (2)$$

< 記号の定義 >

$\gamma$ : 圧力水頭,  $\theta$ : 土壌水分量,  $g$ : フラックス

$K(\gamma)$ : 透水係数,  $C(\gamma) = \frac{\partial \theta}{\partial \gamma}$ : 比水分容量

$C$ : 移動可能な水分量の中に含まれる古い雨水の割合

$Q$ : 間隙率,  $Q_r$ : 移動可能な水がほとんどないときとなる含水率

$\gamma_0$ : 比水分容量が最大値を与える圧力水頭

$\beta$ : 水分量に対する透水性の減少を示すパラメーター

$r$ : 降雨強度,  $K_s$ : 飽和透水係数

また古い雨水の水分量を $\theta_1$ , 新しい雨水の水分量を $\theta_2$ とすると、次式が成立する。

$$\theta_1 + \theta_2 = \theta - \theta_r \quad \cdots (3) \quad C = \theta_2 / (\theta - \theta_r) \quad \cdots (4)$$

一方、土壌物理条件としては、谷が提案した(5)~(7)式を用いる。

$$\theta = (\alpha - \theta_r) \left( \frac{\gamma}{\gamma_0} + 1 \right) \exp \left( -\frac{\gamma}{\gamma_0} \right) + \theta_r \quad \cdots (5) \quad C(\gamma) = \frac{\partial \theta}{\partial \gamma} = -(\alpha - \theta_r) \frac{\gamma_0}{\gamma_0} \exp \left( -\frac{\gamma}{\gamma_0} \right) \quad \cdots (6)$$

$$K(\gamma) = K_s \left( \frac{\gamma}{\gamma_0} + 1 \right)^\beta \exp \left( -\frac{\gamma}{\gamma_0} \right) \quad \cdots (7)$$

②境界条件：図1に示すように、地下水面を深さ $L$ に固定し、そこに雨水が到達すればすぐに流出するとした。以下に境界条件を示す。

$$z=0 \text{ で } r = -K(\gamma) \left( \frac{\partial \gamma}{\partial z} - 1 \right) \quad \cdots (8) \text{ および } gC = 0 \quad \cdots (9), \quad z=L \text{ で } \gamma = 0 \quad \cdots (10)$$

③無次元化：雨水の置換作用に与える諸物理条件の影響を一般的に検討するため、以下のような無次元化を行う。

$$[\text{基礎方程式}] \quad -\gamma_* \exp(\gamma_*) \frac{\partial \gamma_*}{\partial t_*} = \frac{\partial}{\partial z_*} \left\{ (\alpha \frac{\partial \gamma_*}{\partial z_*} - 1) (-\gamma_* + 1)^\beta \exp(\beta \gamma_*) \right\} \quad \cdots (1)'$$

$$\frac{\partial}{\partial t_*} \left\{ C(-\gamma_* + 1) \exp(\gamma_*) \right\} + \frac{\partial}{\partial z_*} \left\{ C(\alpha \frac{\partial \gamma_*}{\partial z_*} - 1) (-\gamma_* + 1)^\beta \exp(\beta \gamma_*) \right\} = 0 \quad \cdots (2)'$$

$$[\text{境界条件式}] \quad \gamma = -(\alpha \frac{\partial \gamma}{\partial z} - 1) (-\gamma + 1)^\beta \exp(\beta \gamma) \quad (z=0) \quad \cdots (8)'$$

$$\frac{\partial}{\partial z_*} \left\{ C(\alpha \frac{\partial \gamma_*}{\partial z_*} - 1) (-\gamma_* + 1)^\beta \exp(\beta \gamma_*) \right\} = 0 \quad (z=0) \quad \cdots (9)'$$

$$\gamma_* = 0 \quad (z_*=1) \quad \cdots (10)'$$

$$t_* = t / (L(\alpha - \theta_r) / K_s), \quad z_* = z / L, \quad \gamma_* = \gamma / \gamma_0, \quad \theta_* = (\theta - \theta_r) / (\alpha - \theta_r), \quad g_* = g / K_s$$

$$\text{ここに } \alpha = -\gamma_0 / L \quad \gamma = r / K_s$$

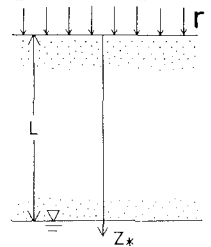


図1 座標系

土壌水分の初期状態としては、フラックス  $q_z = -(\alpha \frac{\partial \theta}{\partial z} - 1)(-\gamma_s + 1) \exp(\beta z) = 0$  という平衡状態  $\gamma_s(z)$  を仮定する。以上の無次元化のもとで、現象を支配するパラメータは  $\alpha, \beta, \gamma$  の3つとなる。 $\alpha$  は水保持特性を表す  $\gamma$  の地下水面までの長さ  $L$  に対する比である。 $\beta$  は土壌の飽和領域における水分量に対する透水性の減少の程度を示している。また  $\gamma$  は降雨強度の飽和透水係数に対する比である。

④数値解析：基礎方程式をimplicitの差分式を用いて差分化し、加速過緩和法を用いて数値解を求めた。

3. 解析結果 解析においては雨水の置換作用に着目しているため、降雨は解析対象期間中降り続けるものとする。また無次元パラメータ  $\beta$  の変化は、 $q_z$  の平衡状態に到達するまでの時間にわずかに影響するだけであることが確認されている。そこで本解析では  $\beta$  を一定にして、 $\alpha$  と  $\gamma$  を変化させ雨水の置換作用について検討する。

①  $\alpha$  の影響：  $\beta$  と  $\gamma$  を一定にして、 $\alpha$  が変化したときの雨水の置換作用について検討する。図2, 4, 6 には、全体の水分量  $Q_z$ 、古い雨水の水分量  $Q_{old}$  および新しい雨水の水分量  $Q_{new}$  の鉛直分布の時間変化の過程が示されている。図3, 5, 7 には最下端  $z=1$  におけるフラックス  $q_z$  が古い雨水と新しい雨水に分離して示されている。これらの図より、古い雨水が新しい雨水に置換され、流出初期においては古い雨水が流出水中に大きな割合を占めることがわかる。さらに、降雨開始  $t=1$  程度で水分量  $Q_z$  は平衡状態、すなわち  $q_z = \gamma$  となるが、新しい雨水が  $z=1$  から流出するまでには  $t=4$  程度かかる。この到達時間は  $\alpha$  が小さいほど短くなっているが、これは初期の無次元水分量  $Q_z(z)$  の違い、すなわち初期状態における土層内の古い雨水の量 ( $Q_{old}(z)$ ) が  $\alpha$  が小さいほど少ないことに起因していると考えられる。

②  $\gamma$  の影響：  $\alpha$  と  $\beta$  を一定にして、 $\gamma$  が変化したときの雨水の置換作用について検討する。図8 には、それぞれの  $\gamma$  に対する最下端  $z=1$  における  $q_z$  の時間変化が示されている。この図から、 $q_z$  が全て新しい雨水になるまでの時間  $T_\gamma$  と  $\gamma$  の間には、 $\gamma \times T_\gamma = \text{一定}$  という関係が成り立つことがわかる。すなわち  $\gamma$  が大きくなると、 $q_z$  も大きくなり、その結果古い雨水の置換に要する時間が短くなる。

4. 降雨実験 先に述べた解析結果の妥当性を検討するために降雨実験を行った。実験では関東ローム土を詰めたラインメータに、降雨強度  $r = 10 \text{ mm/hr}$  の塩水の人工降雨を与え、流出量およびその塩分濃度の時間変化を測定した。図9 には流出量および新しい雨水と古い雨水に分離した流出量が示されており、解析結果と同様に流出初期においては、古い雨水が流出水中に大きな割合を占めることがわかる。

<参考文献>

- 1) Kirkby, M. J.: Hillslope Hydrology (新しい水文学)
- 2) 日野・長谷部：第28回水講 3) 谷：日林誌, Vol. 64, 1982
- 4) 太田・日野・塚本：第27回水講 5) 日野・瀧岡・尾高：第28回水講

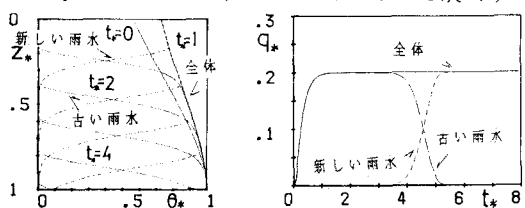


図2  $Q_z$  の鉛直分布 ( $\alpha=0.01, \beta=3, \gamma=0.2$ )

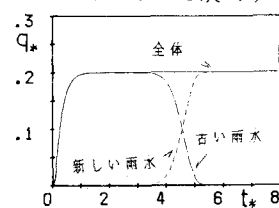


図3  $q_z$  の時間変化 ( $\alpha=0.01, \beta=3, \gamma=0.2$ )

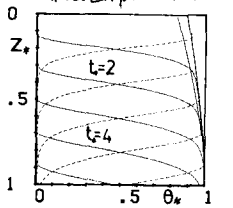


図4  $Q_z$  の鉛直分布 ( $\alpha=0.3, \beta=3, \gamma=0.2$ )

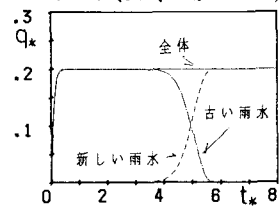


図5  $q_z$  の時間変化 ( $\alpha=0.3, \beta=3, \gamma=0.2$ )

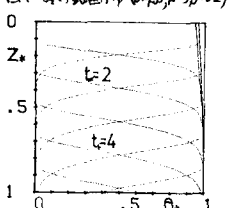


図6  $Q_z$  の鉛直分布 ( $\alpha=2.50, \beta=3, \gamma=0.2$ )

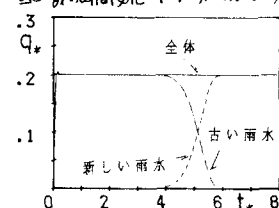


図7  $q_z$  の時間変化 ( $\alpha=2.50, \beta=3, \gamma=0.2$ )

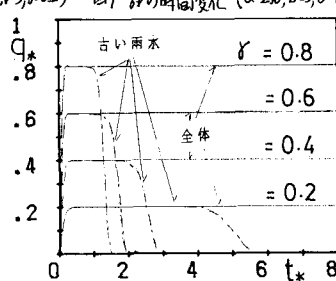


図8  $q_z$  の時間変化に及ぼす  $\gamma$  の効果

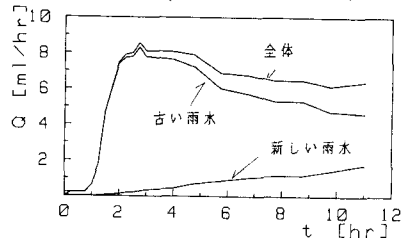


図9 流出量の時間変化