

東京大学大学院 学生員 鈴木猛康
 国立公害研究所 正員 細見正明
 国立公害研究所 正員 村岡浩爾

はじめに 湖沼の富栄養化と湖岸地下水の関連性が明らかにされている。降雨によって生ずる地下水浸透は、ほとんどの場合不飽和浸透であり、吸着効果と相まって、その輸送機構は非常に複雑である。本研究では降雨による浅層地下水の汚濁プロセスを、土壌コラムを用いて実験し、解析を試みた。

1. 実験方法 実験装置は図-1に示す土壌コラムを用いた。多孔質媒体試料は、水洗いしなばらフルイにかけた2種類の川砂を用いて、2ケースについて検討した。その土質特性を表-1に示す。図-1に示すように、コラムの各深さにポーラスカップを埋め込み、真空ポンプによって浸透水を採取した。降雨は定量ポンプにより与えた。実験は次の手順で行なった。(1)降雨パターンは図-2に示すように、まず約1日降雨強度30mm/hourの蒸留水降雨を与え、コラム内に定常状態をつくる。

Case	試料名	平均粒径	比重
Case-1	細砂	0.34 mm	2.755
Case-2	粗砂	0.65 mm	2.695

表-1 土質特性

(2)降雨をNH₄Cl水溶液(Cl⁻ 2530 PPM, NH₄-N 1000 PPM)に変え、実験スタートとする。(3)その後一定時間毎に真空ポンプを作動させ、ポーラスカップから浸透水及び流出水を採取する。同時に流出水の流量を測定する。(4)実験終了後即ちにコラムを分解し、含水比および飽和度を測定する。(5)試料砂を1-N KClで抽出して、NH₄-N吸着量を測定する。

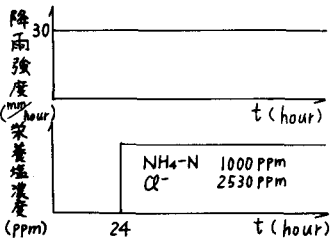


図-2 降雨パターン

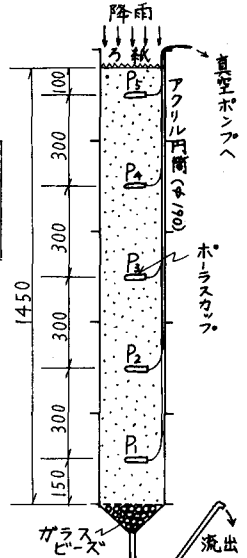


図-1 土壌コラム

2. 解析方法 本実験では、不飽和帯における物質の拡散係数Dは一定と仮定し、飽和浸透流に準じて基礎式を構築した。物質*i*についての質量保存式は、液相について(1)式、固相について(2)式で示される。

$$\varepsilon \cdot S_r A \Delta z \frac{\partial C_i}{\partial t} = \varepsilon \cdot S_r A (J_{i,z} - J_{i,z+\Delta z}) - r_i A \Delta z \quad (1) \quad \text{ここで: } J_{i,z} = -D \frac{\partial C_i}{\partial z} + v C_i$$

$$\rho_s A \Delta z (1 - \varepsilon) \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \rho_s r_i A \Delta z \quad (2)$$

(2)式で $\theta_i = K C_i$ と仮定すれば、(1)、(2)式より(3)式の基礎式が得られる。

$$\frac{\alpha + K \rho_s (1 - \varepsilon) / \rho_s}{\alpha} \frac{\partial C_i}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} - v \frac{\partial C_i}{\partial z} \quad (3)$$

(3)式を下の条件のもとで解けば、(4)式の解が得られる。

$$C_i(0, t) = C_0, \quad t \geq 0$$

$$C_i(\infty, t) = 0, \quad t \geq 0$$

$$C_i(z, 0) = 0, \quad z > 0$$

$$\phi = \frac{C_i}{C_0} = \frac{1}{2} \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{Z}{2\sqrt{T}} - \sqrt{T} \right) + \exp(2Z) \operatorname{erfc} \left(\frac{Z}{2\sqrt{T}} \right) \right) \quad (4)$$

ただし、 $Z = v z / 2D$

$$T = \frac{v^2}{4D} \frac{\alpha t}{\alpha + K \rho_s (1 - \varepsilon) / \rho_s}$$

- A; 断面積, ε ; porosity
- S_r ; 飽和度, J; flux
- C_i ; 溶液の*i*物質濃度
- r_i ; 固相への*i*物質取込み率
- D; 拡散係数, v ; 浸透速度
- ρ_s ; 土粒子密度, ρ_s ; 溶液密度
- α ; $\varepsilon \cdot S_r$, K; 吸着の比例定数
- θ_i ; 固相表面の吸着量についている*i*物質濃度
- C_0 ; 降雨の*i*物質濃度

(1) 浸透速度 v は、流量を実質流水断面積で除して算出する。(2) 拡散係数 D は(4)式において $T = \frac{2L^2}{D}$ とし、Harleman、Rumerの方法により、非吸着物質である Cl^- の比濃度～時間曲線を用いて決定する。

3. 実験結果と考察 飽和度の鉛直分布を図-3に示す。不飽和帯においては、飽和度あるいは含水比がほぼ一定であるため、拡散係数は不飽和帯で一定と考えてよい。 Cl^- の比濃度～時間曲線を図-4に示す。(Case-1は省略) これより拡散係数を決定した。吸着物質である NH_4-N の比濃度～時間曲線を図-6および図-7に示す。 NH_4-N は砂粒子に吸着されるため、 Cl^- と比較して流出に大きな時間のずれが見られる。なお図中 $P_1 \sim P_5$ はそれぞれ深さ10, 40, 70, 100, 130 cmの浸透水の比濃度と時間の関係を示している。

4. 吸着試験 吸着に関する比例定数 K を決定するため、メスフラスコに乾燥試料30gを入れ、それぞれに NH_4-N 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 ppm NH_4Cl 水溶液 100 ml を加え、よく振とうし、一定時間後の上ずみ液の濃度を測定した。その結果得られた吸着等温線を図-5に示す。図は Freundlich 型となるが、ここでは直線近似し、 K を決定した。実験後のコラム内試料の NH_4-N 吸着量は Case-1 で 0.46 mg/g 、Case-2 で 0.27 mg/g で鉛直方向にはほぼ一様であり、それぞれの不飽和状態での最大吸着容量に達しているものと思われる。 NH_4-N 物質収支として、降雨として与えられた NH_4-N 量と、流出、吸着したものを、コラム中に浸透水として存在するものを合計した NH_4-N 量の差をみると、その誤差は両ケース共に5%以内であった。

5. まとめ 以上の結果を表-2にまとめ、これらの数値より P_1, P_2, P_3 の理論曲線を求めて図-6, 図-7に実線で示した。

このように不飽和浸透流に伴う NH_4-N の挙動が、ほぼシミュレートできた。理論値と実験値のずれは、主として吸着項によると思われる。すなわち $c_s = Kc_w$ と直線近似したこと、 K を求めるための吸着試験が飽和状態であるため、実際の現象を十分説明していない。これらの点を今後の課題としたい。最後にこの研究に際し、有益な助言を賜わ、た埼玉大学・佐藤助教授に、謝意を表する次第である。

	Case-1	Case-2
v (cm/sec)	3.53×10^{-3}	5.36×10^{-3}
D (cm ² /sec)	0.0021	0.022
E	0.510	0.428
間隙比	1.04	0.75
透水性係数 (cm/sec)	1.13×10^{-2}	1.80×10^{-2}
S_r (%)	46.2	36.3
K	0.24	0.23

表-2 結果のまとめ

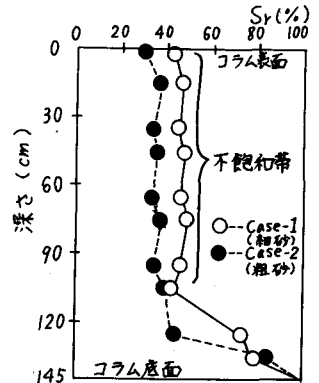


図-3 飽和度 S_r の鉛直分布

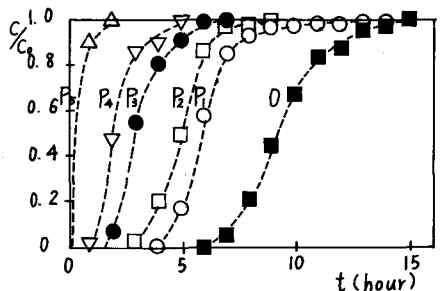


図-4 Cl^- 比濃度～時間 (Case-2)

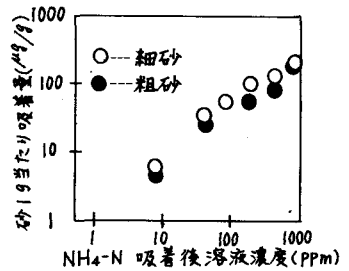


図-5 砂の吸着等温線

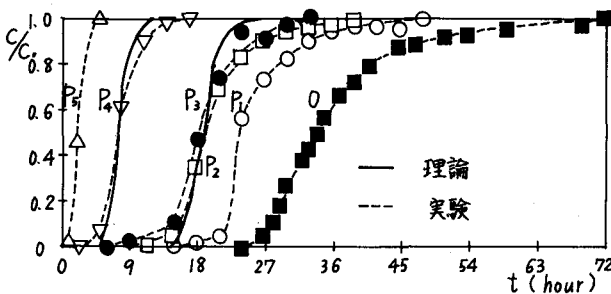


図-6 NH_4-N 比濃度～時間 (Case-1)

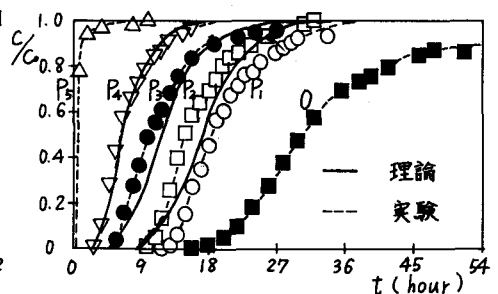


図-7 NH_4-N 比濃度～時間 (Case-2)