

地表付近の不飽和帯における溶解性汚染物質の分散現象

岐阜大学 工学部 学生員 棚橋秀行

大豊建設(株) 祖父江崇

岐阜大学 工学部 正会員 佐藤 健

岐阜大学流域環境研究センター 正会員 湯浅晶

1. 目的

地下水・土壌の汚染が社会的な問題となっており、近年は特に地表面付近における不飽和帯における汚染物質の挙動についての関心が高まっている。汚染物質の挙動を把握するためには、地盤内の水分の移動に加えて分散現象・吸着反応などを考慮する必要がある。本研究は、不飽和状態下における汚染物質の分散現象について着目し、1)分散係数と飽和度の明確な関係を把握し、この関係を力学的に説明すること、2)土の間隙指標として水分保持特性曲線に着目し、これを出発点として分散現象と土の間隙構造との関連性を考察すること、の2つを目的に行ったものである。

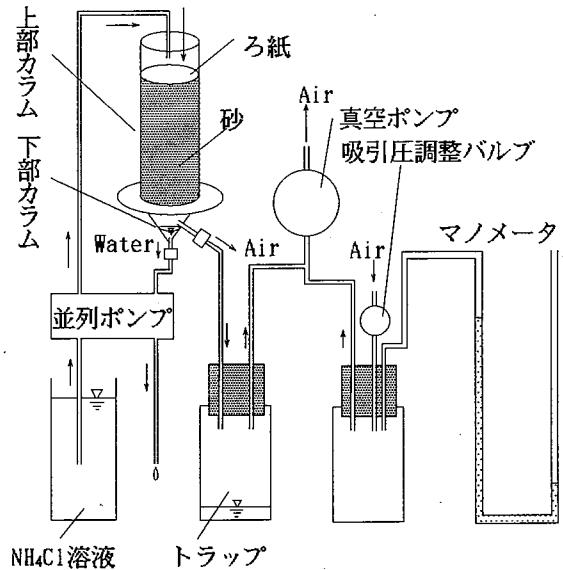


図-1 空気吸引不飽和カラム実験装置

2. 分散係数の推定法

1次元移流分散方程式は以下のように与えられる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{v}{R} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{D}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

ここで、 C : 間隙水濃度(g/cm^3), x : 距離(cm),
 v : 実流速(cm/min), D : 分散係数(cm^2/min),
 t : 時間(min), R : 遅延係数(-)である。遅れ係

数 R は $R = 1 + \frac{\rho_d}{\theta} k_d$ で定義される (θ : 含

水率(cm^3 -water/ cm^3 -soil), ρ_d : 土の乾燥密度(g/cm^3), k_d : 固液分配係数(cm^3/g)。非吸着性物質では $k_d = 0$ であり、遅れ係数 $R = 1$ である。原水濃度 C_0 の溶液を無限長カラムの $x = 0$ の点から流入させたとき、距離 x の点における相対濃度 (C/C_0) は式(2)によってあたえられる。

表-1 実験条件

	q=0.0708cm/min				
	L (cm)	a (cmH ₂ O)	Sr (%)	v (cm/min)	C ₀ (mg-N/l)
EX. 1	23.0	170.0	29.5	0.578	100
EX. 2	23.0	110.0	36.1	0.473	100
EX. 3	12.0	7.0	86.3	0.198	100
EX. 4	24.5	0	100.0	0.171	100
EX. 5	23.0	170.0	32.3	0.528	1000
EX. 6	12.0	7.0	92.0	0.185	1000
EX. 7	12.0	21.5	75.1	0.227	100
EX. 8	12.0	21.5	72.7	0.235	100
EX. 9	12.0	33.5	59.3	0.288	100
EX. 10	12.0	24.5	65.3	0.261	100
	q=0.1160cm/min				
EX. 11	24.5	0	100	0.280	100
	q=0.2190cm/min				
EX. 12	24.5	0	100	0.528	100

q: Darcy velocity, L: length of column, a: degree of vacuum, Sr=(θ/n): degree of saturation, v: pore water velocity, C₀: NH₄⁺-N inlet concentration.

Dispersivity of missible contaminant within unsaturated zone near ground surface : H. TANAHASI (Department of Civil Engineering, Gifu University), T. SOBUE(Diho Construction), T. SATO, A. UASA (Gifu University).

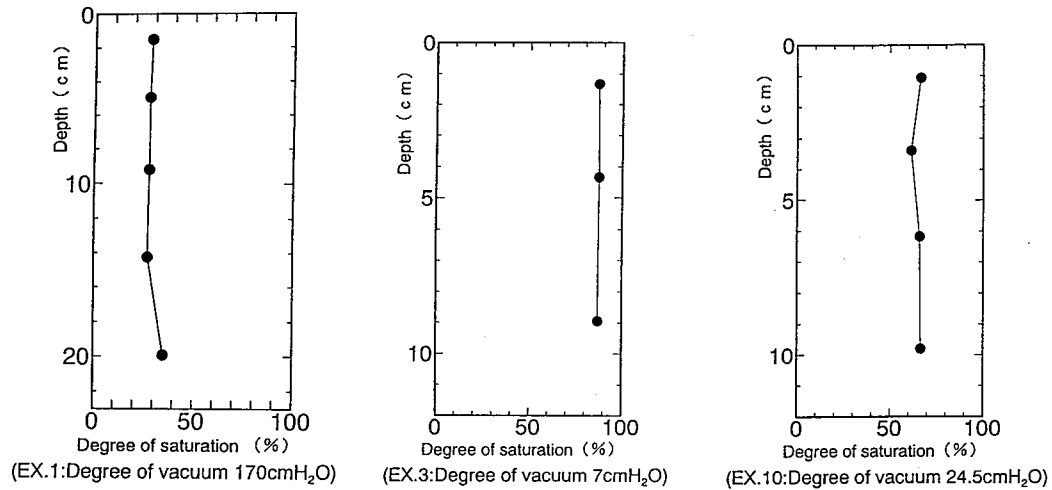


図-2 カラム内飽和度分布

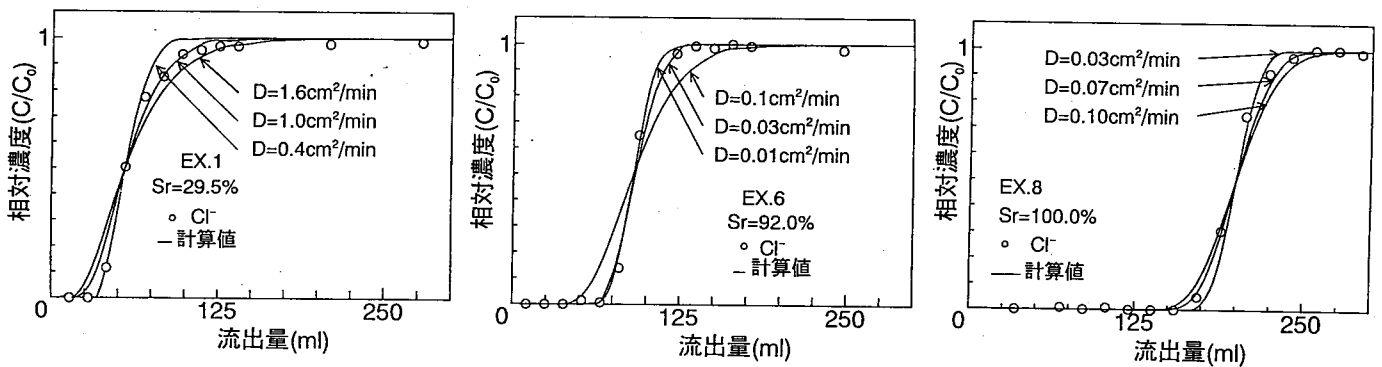


図-3 破過曲線と分散係数の探索

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{x-vt/R}{2\sqrt{Dt/R}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{x+vt/R}{2\sqrt{Dt/R}} \right) \cdot \exp \left(\frac{vx}{D} \right) \right\} \quad (2)$$

ここで、 erfc は余誤差関数である。分散係数(D)は、式(2)による計算破過曲線を実測破過曲線にfittingさせて求めた。

3. 実験方法

図-1に空気吸引不飽和カラム実験装置を示す。砂層カラムの下部には真空ポンプによって負圧が与えられており、空気を砂層内に流すことによって、カラム内の飽和度を均一な状態にできる。吸引圧は吸引圧調整バルブによって制御され、その大きさはマンメーターによって大気圧との水頭差から読み取れる。このカラムに試料土として豊浦標準砂(粒径 $110 \sim 420 \mu\text{m}$)を乾燥密度 $\rho_a = 1.55(\text{g}/\text{cm}^3)$ で充填した。並列ポンプを用いて砂層カラム上端へ汚染物質として NH_4Cl 溶液を一定流量で散水し、下部から同じ流量を排水した。流出水中の非吸着性物質である Cl^- の濃度の時間的変化を測って破過曲線を記録した。実験条件を表-1に示した。

4. 結果

4.1 飽和度分布

実験直後のカラムから数ブロックに分けて試料砂を素早く取り出し、秤量法によって飽和度を測定した。

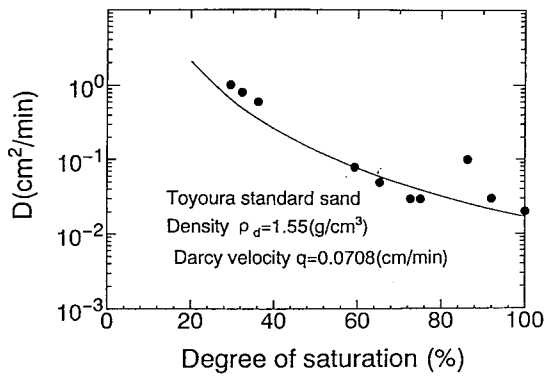


図-5 飽和度と分散係数の関係

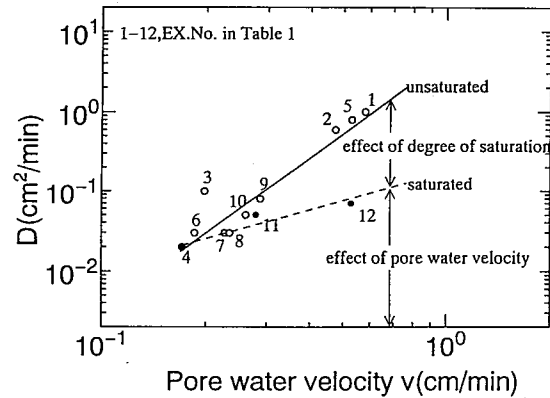


図-6 実流速と分散係数の関係

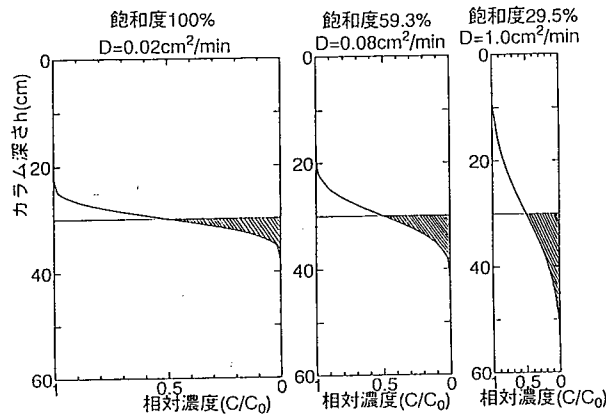


図-7 異なる飽和度における濃度分布

飽和度はカラム全長にわたってほぼ均一になっていることが図-3から見てとれる。また、表-1に示したように、29.5%~92.0%と比較的広い範囲にわたって飽和度が均一に制御できた。

4.2 分散係数と破過曲線

Cl⁻の破過曲線を図-4に示した。実線は式(2)による計算値であり、白丸の実験値と最もfitするような分散係数を探索したものである。この探索の結果から求められた、ダルシー流速一定下で行われた実験ケース(EX1~12)における飽和度と分散係数の関係を図-5に示した。図-5から、飽和度が小さくなるにつれて分散係数が大きくなっていく傾向があることがわかった。

5. 考察

5.1 実流速の分散係数に与える影響

実流速と分散係数の関係を図-6に示した。飽和度一定条件下では実流速の増加とともに分散係数も増加する(図-6の破線:EX. 4, 11, 12)。実流速一定条件下では飽和度の減少とともに分散係数が増加する(図-6のEX. 12とEX. 5)。よってダルシー流速一定条件下で飽和度が変わった場合(図-6:実線EX. 1~10)では、上記の2つの影響双方によって分散係数の値が変化していることがわかる。

5.2 Cl⁻の濃度分布に見られる傾向

平均流が、ある深さ(x=l)に達したときのCl⁻の濃度分布(C/C₀ vs x)の形状は、図-7に示したように飽和度によって異なっている。しかし、面積に着目してみると次のような傾向があることがわかった。

$$\int_0^{\infty} (C/C_0) dx \propto \frac{1}{\theta}$$

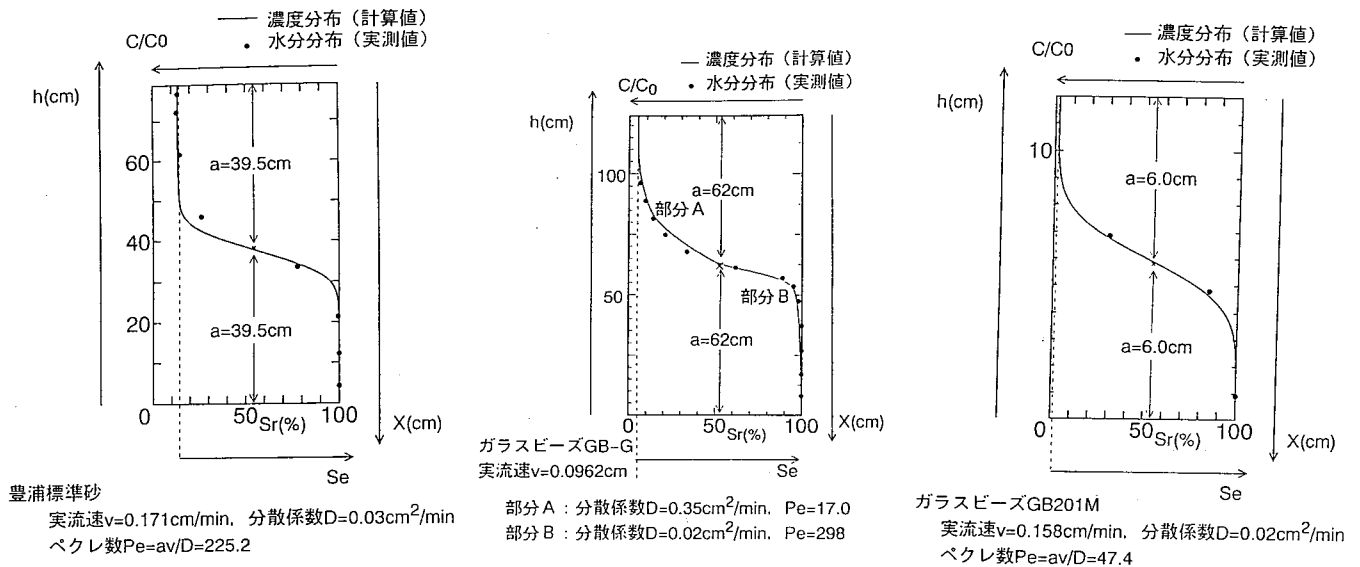


図-8 水分保持特性曲線と濃度分布の形状の比較

このことから、深さ(l)の点を越えて分散している溶質の単位断面あたりでの総質量、

$$\theta \int_0^{\infty} (C/C_0) dx$$

は飽和度に関係であることがわかった。なお、図-7の横軸はこのことが視覚的に捉えられるように、相対濃度を飽和度の比で便宜的に表示したものである。以上のことから、飽和度が変わっても分散する溶質の質量が同じになるメカニズムを明らかにできれば、飽和度と分散係数の関連性の力学的説明が可能になるのではないかと考えられる。また、図-7の3つのケースの間では、充填されている砂の密度、粒径だけが共通であり、飽和度、実流速は異なることから、もしかすると分散現象は基本的に土の密度、粒径といった土の間隙構造に支配されているのではないかと考察できる。

5.3 水分保持特性曲線と濃度分布の相似性

土の間隙指標として水分保持特性曲線があるが、これと溶質の濃度分布の形に相似性があることに気がついた。このことについて検討するため、先述の豊浦標準砂、ガラスビーズGB-G(粒径 $120\sim 212\mu\text{m}$)とガラスビーズGB201M(粒径 $850\mu\text{m}$ 以下をカットしたもの)の3つの試料で実測水分保持特性曲線と濃度分布の形状の比較を行った。水分保持特性曲線は1つの土試料について固有であるのに対して、濃度分布は時間とともに刻々と形状も位置も変化していく。そこで、両者の形がS字型になることに着目し、両者の変曲点を中心に重ね合わせることを考えた。水分保持特性曲線の変曲点は有効飽和度 $Se=0.5$ のあたりである。濃度分布は $h=0$ の点からこの点までの距離(a)と同距離を、濃度分布の中心(相対濃度 0.5)が降りてきた瞬間を考え、変曲点の位置を合わせた。この計算結果を図-8に示す。この図から、全ての場合について水分保持特性曲線と濃度分布の形状がほぼ一致していることがわかる。この結果は分散現象と土の間隙構造の関連性を示唆する興味深いものであるが、どのような科学的根拠を伴って説明すればよいのか、まだわからない。

6. 結論

本研究で得られた主要な知見は次の通りである。

- ①ダルシー流速一定条件下における飽和度と分散係数の間には、図-5のような左上がりの曲線関係があることがわかった。
- ②カラム内の同位置における分散した溶質の質量が、飽和度によらず等しくなることがわかった。
- ③飽和状態における溶質の濃度分布と水分保持特性曲線の形状がある条件下においてほぼ等しくなることが、3つの土試料全てにおいて確認できた。