

# 空気吸引カラムを用いた不飽和砂層中の溶質の分散現象

棚橋秀行<sup>1</sup>・佐藤 健<sup>2</sup>・湯浅 昌<sup>3</sup>・宇野尚雄<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生員 岐阜大学大学院 工学研究科 生産開発システム工学専攻 博士後期課程

<sup>2</sup>正会員 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

<sup>3</sup>正会員 岐阜大学教授 流域環境研究センター

<sup>4</sup>正会員 岐阜大学教授 工学部土木工学科

不飽和砂層中における溶質の分散係数を、空気吸引不飽和カラム試験によって推定した。空気吸引は砂層カラム内の飽和度分布を均一にするためのもので、分散係数と飽和度との関係を正確に把握する上で効果的な方法であることが確認できた。分散係数は、一次元移流拡散方程式とカラム下端での溶質の破過曲線との比較から求めた。一連の実験と解析結果より、分散係数は飽和度が低くなるほど大きくなる傾向にあることを見い出し、不飽和状態下の間隙水の存在形態より、分散係数の飽和度依存性を考察した。

**Key Words :** column test, vacuum, unsaturated soil, breakthrough curve, dispersion, solute transport, contamination problem.

## 1. 研究の動機

ゴミの埋め立て処分、あるいは農薬の散布などによる地下水汚染が問題になっている<sup>1), 2)</sup>。これらの問題のいくつかは、地表付近の汚染物質がその後の降雨などによって不飽和土中を移動し地下水帯にまで到達した結果生じたものと理解される。地下水汚染問題に対する初期段階での対応を考えるうえからも、地表付近の不飽和土中における汚染物質の挙動を正確に把握することは重要な仕事である。

不飽和帯における溶質輸送に関する研究が、飽和帯の研究と同じように多く行われている<sup>3)-10), 12), 15)-17)</sup>。これまでの研究から、不飽和カラム試験による溶質の破過曲線は、飽和の結果と比べて、流出濃度が原水濃度に近づくのが遅れた形状となる（以下 tailing 現象と呼ぶ）ことが知られている<sup>5)-8)</sup>。不飽和土中における輸送現象についての考え方には、①分散現象のみを考慮するもの、②分散現象だけでなく、土中の間隙水を可動水と不動水に区分し、この間の物質移動あるいは分子拡散も考慮するもの、の 2 つの考え方がある。一般に、不飽和カラム試験の破過曲線上に現れる tailing 現象は、飽和度が低くなるほど顕著になる傾向にある。この現象を①の考え方で説明した例に、佐藤・村岡の研究<sup>6)</sup>がある。彼らは細砂（平均粒径 340 μm）と砂（平均粒径 650 μm）を用いて不飽和カラム試験を行い、両試料において飽和分散係数より不飽和分散係数のほうが大きくなつたと報告し

ている。②の考え方を応用した例として、Smedt and Wierenga の研究<sup>7)</sup>がある。彼らは直径 74~125 μm のガラスビーズを用いて不飽和カラム試験を行い、tailing 現象を確認するとともに、破過曲線を①の考え方で表現しようとすると飽和状態における同一実流速の場合よりも 20 倍程度に分散係数を大きくする必要があることを指摘した。また、間隙水を可動水・不動水に区分し、飽和度が低くなると分散係数が大きくなるのではなく、可動水・不動水間の物質移動が顕著になる、という考え方を示した。Smedt and Wierenga<sup>7)</sup>の用いたモデルは van Genuchten and Wierenga によって提案された Two-Region モデル<sup>8)</sup>（以下 TR モデルと呼ぶ）である。

著者らは、非吸着性物質 (Cl<sup>-</sup>) と吸着性物質 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) を用いた不飽和カラム試験を行い、得られた破過曲線を再現する、TR モデルのパラメータの推定方法について検討している<sup>9)</sup>。モデルのパラメータは実測破過曲線との fitting でしか求められないため、複数の溶質を同じ実験状態で流した場合に、共通になるべき分散・物質移動・間隙水区分などの流れに関するパラメータが違う値に推定され、これをどう考えればよいのかが問題になった。この問題を解決するには、不飽和土中における分散現象などの溶質輸送に関する基本的なメカニズムが、まず明確にされる必要があると考えた。

従来の不飽和土中の分散に関する研究では、実験における飽和度が不明<sup>10)</sup>であったり、飽和度と分散係数の関係を強く意識して実験結果の整理がなされていない<sup>7)</sup>、

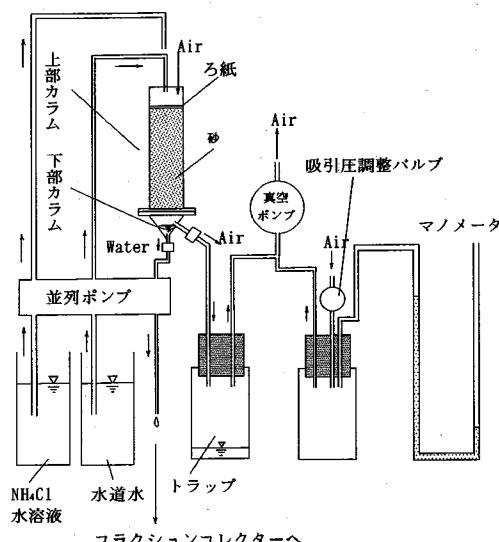


図-1 空気吸引不飽和カラム実験装置

等の問題点の多いことがわかった。地表面から地下水帯に至るまでの実地盤における飽和度分布は鉛直方向に複雑に変化しており、この間の不飽和土中を移動する溶質の挙動を精度良く追跡するためには、溶質の分散現象と土中の飽和度がどのような対応関係にあるのかを明確にすることが大変重要になる。しかるに、不飽和帯における溶質輸送現象を特徴づける最も基本的なパラメータの1つである分散係数が、飽和度とどのような関係にあるのか、正確に実験した研究は見あたらない。

本研究は、図-1の空気吸引カラムを用いることによって砂層内の飽和度分布を均一に保ちながら、不飽和帯中の非吸着性溶質の輸送実験を実施して、得られた破過曲線と①の考え方のモデル（以後、②のモデルとの区別のため One-Region モデルとよぶ）との fitting から、分散係数の飽和度依存性を検討したものである。

## 2. 分散現象

分散係数と飽和度の関係を議論する前に、分散現象とはどういったものなのかを考えてみる。玉井<sup>11)</sup>によれば分散は次のように定義されている。

**分散：**ある断面における、与えられた方向の真の輸送量と、空間的な平均量を用いて記述したその方向の輸送量との偏差をいう。

地下水汚染が問題になっている場において、ここで用いられる空間的な平均量というのは具体的には空間的に平均化した間隙水の流動速度のことである。拡散は次のように定義されている。

**拡散：**ある点における、与えられた方向の真の輸送量

と、時間的な平均量を用いて記述したその方向の輸送量との偏差をいう。

ここで、時間的な平均量というのは具体的には時間的に平均化した間隙水の流動速度のことである。拡散には層流中における分子拡散と乱流中で生ずる乱流拡散がある。土中の分子拡散に着目した研究例は多い<sup>12)-14)</sup>。一般に土中の間隙水の流れは層流であるので、分散係数の内容として考慮すべき要因は分散と分子拡散である。分散係数を機械的分散係数 ( $D_m$ ) と呼び、分子拡散係数 ( $D_d$ ) との和を水理学的分散係数 ( $D_h$ ) と呼ぶこともある（式(1)）。

$$D_h = D_m + D_d \quad (1)$$

実験結果から求められるのは水理学的分散係数 ( $D_h$ ) であるが、分子拡散係数 ( $D_d$ ) は通常のカラム試験における流速の時間スケールに対してかなり小さい（25±0.1°C、濃度 0.1~4.0 mol/l における塩化物などの電解質トレーサーの分子拡散係数は  $10^{-6}$ ~ $10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/sec のオーダーである<sup>15)</sup>）ので、水理学的分散係数 ( $D_h$ ) はほとんど機械的分散係数 ( $D_m$ ) であると考えて差し支えない（式(2)）。本研究では、実験結果から求められたものを機械的分散係数 ( $D_m$ ) であるとし、これを単に分散係数 ( $D$ ) と呼び検討する。

$$D \equiv D_m \doteq D_h \quad (2)$$

分散現象は、定義からも分かるように間隙水の流れの場所的な違いによって溶質が散らばってゆく現象である。そのため、分散係数は間隙水の流速の大きさと密接な関係があり、種々の実験式が提案されている。そのほとんどは、分散係数と間隙水の実流速との間には、両対数紙上で線形に近い関係があるというものが<sup>7), 10), 16)</sup>、飽和度との関係を検討した例はほとんどない。

## 3. 分散係数の推定

非吸着性溶質の一次元移流拡散方程式は、式(3)のように表わされる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3)$$

ここで、 $C$ ：間隙水中における溶質濃度、 $x$ ：距離、 $v$ ：間隙水の実流速、 $D$ ：分散係数、 $t$ ：時間。式(3)の1次元移流拡散方程式における分散係数 ( $D$ ) は、厳密には機械的分散以外にも分子拡散その他の流れの乱れの要因を全て含んだものである。溶質の初期濃度がゼロの無限長カラムの一端 ( $x=0$ ) に濃度  $C_0$  の溶質を流入させたとき、位置  $x$  の点での間隙水中の溶質相対濃度 ( $C/C_0$ ) は式(4)のようになることが知られている。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left\{ erfc \left[ \frac{x-vt}{2\sqrt{Dt}} \right] + erfc \left[ \frac{x+vt}{2\sqrt{Dt}} \right] \cdot \exp \left[ \frac{vx}{D} \right] \right\} \quad (4)$$

表-1 実験条件

実験名	ダルシー流速 $v$ (cm/min)	砂層厚 $z$ (cm)	空気吸引圧 $\Delta h$ (cm水頭)	飽和度 Sr (%)	原水濃度 $C_0$ (mg-N/l)
EX. 1	0.0708	23.0	170.0	29.5	100
EX. 2	0.0708	23.0	110.0	36.1	100
EX. 3	0.0708	12.0	7.0	86.3	100
EX. 4	0.0708	24.5	なし	100.0	100
EX. 5	0.0708	23.0	170.0	32.3	1000
EX. 6	0.0708	12.0	7.0	92.0	1000
EX. 7	0.1160	24.5	なし	100.0	100
EX. 8	0.2190	24.5	なし	100.0	100

ここで,  $erfc$ : 余誤差関数.

式(4)の  $x$  にカラム試験の砂層厚,  $v$  に間隙水の実流速としてダルシー流速を体積含水率で除した値を用いて、相対濃度を計算した計算結果と、4. で述べる実験から得られた実測破過曲線とを重ね合わせ、特に相対濃度 0.9 附近での実測破過曲線の形状を最もよく再現するよう式(2)中の分散係数 ( $D$ ) を求めた。このようにして求めた理由は、相対濃度 0.9 附近において、分散係数 ( $D$ ) の変動に対する計算破過曲線の違いが最も明確であること、および実測点が多く精度的に信頼性が高いためである。

#### 4. 実験

図-1 に、空気吸引不飽和カラム実験装置<sup>9), 17), 18)</sup>を示した。カラム内に粒径  $110 \sim 420 \mu\text{m}$  の豊浦標準砂を乾燥密度  $\rho_d = 1.55 \text{ g/cm}^3$ 、間隙率  $n = 0.415$  になるように水中落下させて充填した（なお、本研究における乾燥密度はすべて  $\rho_d = 1.55 \text{ g/cm}^3$  に統一した）。並列ポンプを用いて、この砂層カラム上端へ残留塩素を取り除いた水道水を一定流量で散水し、下部から同じ流量を排水して定常流場をつくった。この後、水道水と同じ流量の  $\text{NH}_4\text{Cl}$  溶液（原水濃度  $C_0$ ）に切り替えて散水し、流出濃度 ( $C$ ) の変化を破過曲線（図-3 の白丸）として記録した。濃度測定は、 $\text{NH}_4^+$  をインドフェノール青による発色、 $\text{Cl}^-$  を硝酸銀滴定によって測定した。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、空気が砂層内を流れている。空気とともに真空ポンプ側に入った水はトラップに貯められる。この吸引による真空度は吸引圧調整バルブによって制御でき、その大きさをマノメータからよみとった大気圧との水頭差（図-2 中の Applied Vacuum）として示した。真空度を大きくするほど砂層内の飽和度は小さくなる。

本研究での実験条件を表-1 に示した。従来の不飽和帶での分散係数を測定した研究は、実流速との関連を調べることに主眼が置かれていたために実流速の値の幅が広く、その結果からでは飽和度との関連が考察しにくい

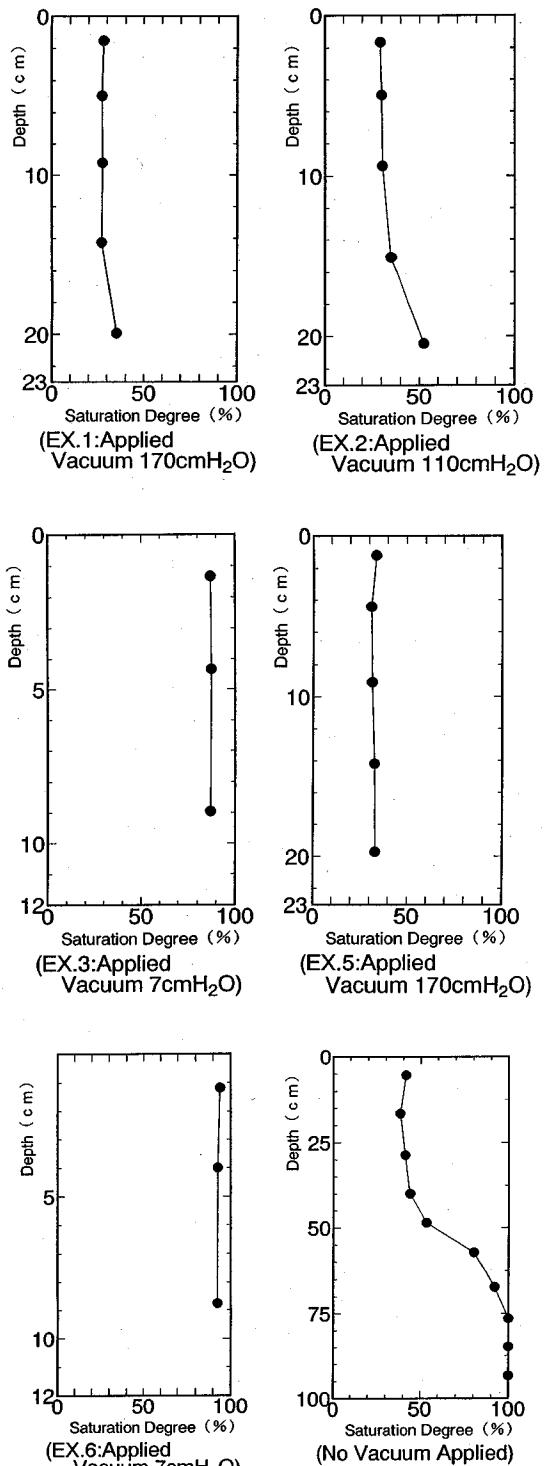


図-2 砂カラム内の飽和度分布

問題があった。そこで、本研究では実流速ではないが、ダルシー流速をすべて  $0.0708 \text{ cm/min}$  で統一して不飽

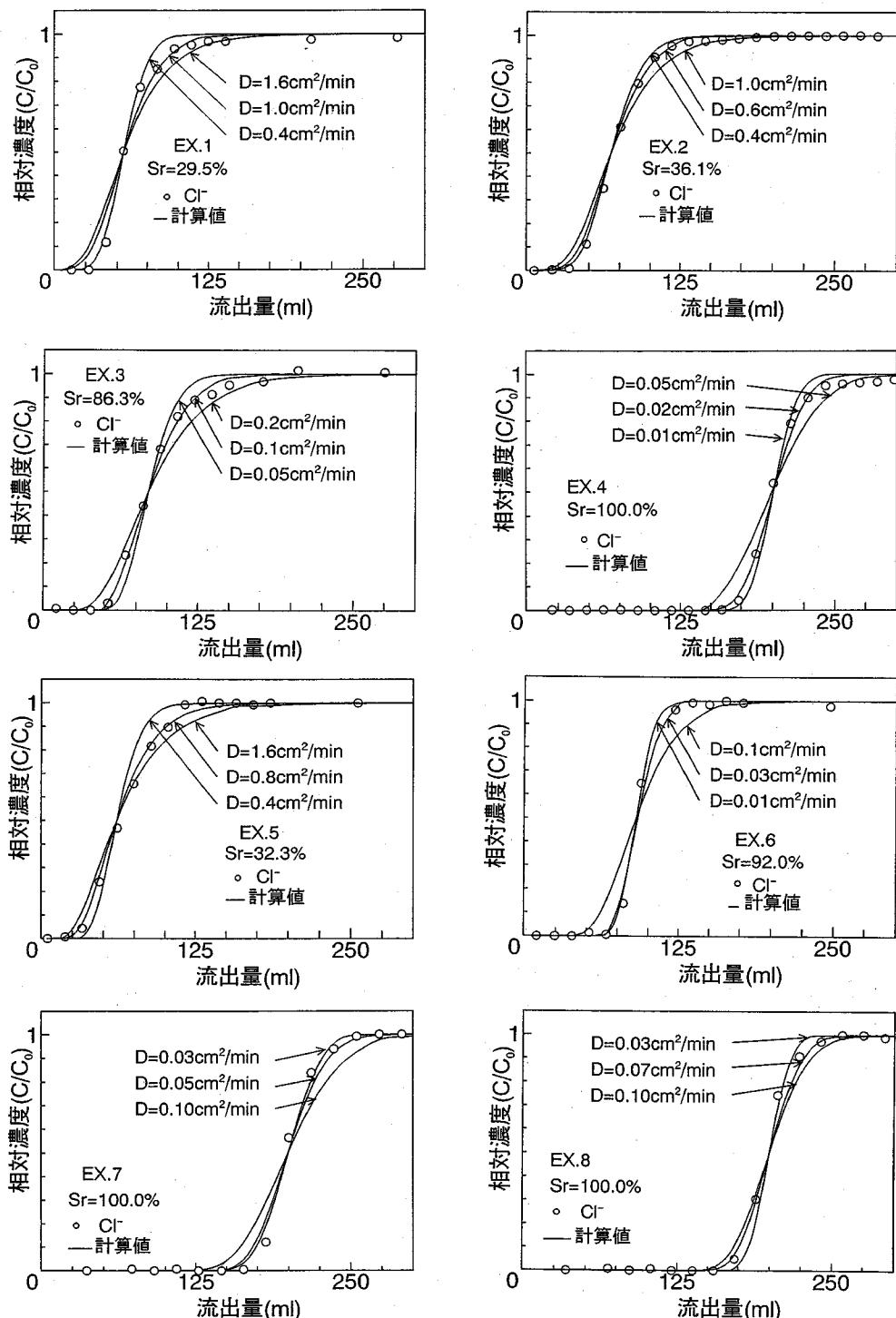


図-3 実測破過曲線と分散係数推定のための計算結果

表-2 実流速と分散係数の関係を調べた既往の研究

研究者名 関係式等	De Smedt and Wierenga <sup>7)</sup>	小谷佳人・矢野友久 <sup>10)</sup>
実流速と分散係数の式	$D = 7.083 \times 10^{-4} + 0.021v$ $+ 31.68v^2 / (1.88 + 60.48v)$	$D = 3.089v^{1.138}$
実験条件	飽和(Sr=100.0%)	飽和度一定(Sr=const., 数値不明)
溶液(着目溶質)	CaCl <sub>2</sub> 水溶液(Cl <sup>-</sup> )	NH <sub>4</sub> Cl水溶液(Cl <sup>-</sup> )
試料 (粒径・充填乾燥密度)	glass beads (平均径0.10mm・1.56g/cm <sup>3</sup> )	砂丘砂 (有効径0.191mm・1.60g/cm <sup>3</sup> )

和状態の実験を行った。実流速の影響の考慮のために、EX.4, 7, 8 の飽和状態の実験も行った。

## 5. 結 果

### (1) 飽和度分布

本研究の EX.1～EX.3, EX.5, EX.6 で使用した空気吸引装置によるカラム内飽和度分布 (EX.4, 7, 8 は飽和のため省略), および比較のために空気を吸引せずカラム下端に水面を設けた場合 (ここでもダルシー流速は 0.0708 cm/min) のカラム内飽和度分布を図-2 に示した。飽和度分布は、実験後のカラムの下端から順に上端へと素早く砂を取り出して秤量し、その後乾燥炉に入れて乾燥前後の質量差から求めた。

カラム下端に水面を設けた場合 (図-2 の No Vacuum Applied) には、下端から 25 cm ほどにいわゆる毛管飽和帯が形成され、それより上方に向かって飽和度が減少している。地下水水面以浅の実地盤における飽和度分布もほぼこのような傾向になっていると考えられ、このような飽和度非均質場における溶質輸送機構が、著者らの研究の対象である。しかしながら、飽和度が一定でない場における分散現象を直接検討するのは難しいため、飽和度の均一な場で実験を行い、飽和度と分散係数の関係を調べた。EX.1～EX.3, EX.5, EX.6 の結果から、カラム下端からの空気吸引によって、ほぼ完全に均一な飽和度分布の流れ場を形成できることが確認できる。また、空気吸引法では低飽和度から高飽和度 (本研究では 29.5% から 92.0%) までの広い範囲においてカラム内の飽和度を均一にできているので、飽和度の違いが分散現象に及ぼす影響が、図-1 のような実験方法で正確に検討できることがわかる。

### (2) 破過曲線

飽和カラム実験・空気吸引不飽和カラム実験後の破過曲線を図-3 に示した。縦軸は原水濃度 ( $C_0$ ) に対する流出濃度 ( $C$ ) の相対濃度、横軸は砂層に NH<sub>4</sub>Cl 溶液の最初の一滴が入った瞬間をゼロにした流出量である。

白丸で Cl<sup>-</sup> の濃度変化を表した。Cl<sup>-</sup> は非吸着性物質であり、破過曲線の形はほとんど分散現象の影響で決まる。

### (3) 分散係数の探索

式 (4) によって計算した破過曲線を図-3 に実線で示した。分散係数の値の大小に関わらず相対濃度 0.5 の点に達するのは同一の流出量のときになる。

図-3 の Cl<sup>-</sup> 実測破過曲線 (白丸) に計算した破過曲線 (実線) を重ね、両者が最も一致する際の分散係数を求めた。ダルシー流速の等しい条件下で行った EX.1～6 の、飽和度と分散係数の関係を図-4 に示した。図-4 から、飽和度が低くなるにつれて分散係数が大きくなっていく傾向のあることがわかる。NH<sub>4</sub>Cl 溶液濃度を 100 mg-N/l と 1 000 mg-N/l とした 2 種類の実験を行ったが、今回の実験における溶液濃度の範囲では、濃度の違いによる分散係数の差はほとんどみられなかった。

## 6. 考 察

### (1) 不飽和帯における分散係数と実流速の関係

従来から分散係数と実流速には、両対数紙上ではほぼ直線的な関係があることがわかっている。本研究の不飽和カラム試験ではダルシー流速を同一にして実験を行っているので、飽和度が低い実験ケースほど実流速は大きい。図-4 の結果から、飽和度が低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を指摘した。しかし、飽和度そのものが分散係数に影響しているのではなく、飽和度の低い実験ケースほど実流速が大きいために、分散係数が大きくなっているに過ぎないのでないかとも考えられた。そこで、この点についての考察を加えるため、飽和度 100% で実流速を異なる大きさにして行った実験ケース EX.4, 7, 8 における分散係数の変動 (黒丸) と、不飽和における実流速の変化による分散係数の変動 (白丸) を比較した。また、既発表の研究例のうち本研究と同じく着目溶質に Cl<sup>-</sup>、試料に砂もしくは粒径の近いガラスピーブズを用い、飽和状態あるいは同一の飽和度で実験を行って実流速と分散係数の関係を検討している

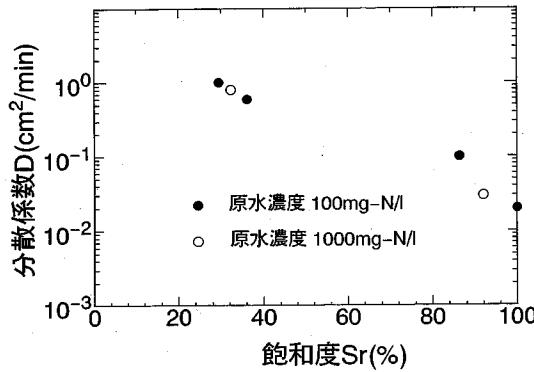


図-4 飽和度と分散係数の関係（ダルシー流速一定）

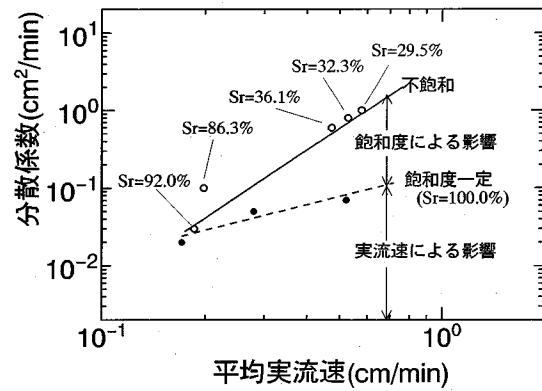


図-6 分散係数に実流速と飽和度を与える影響

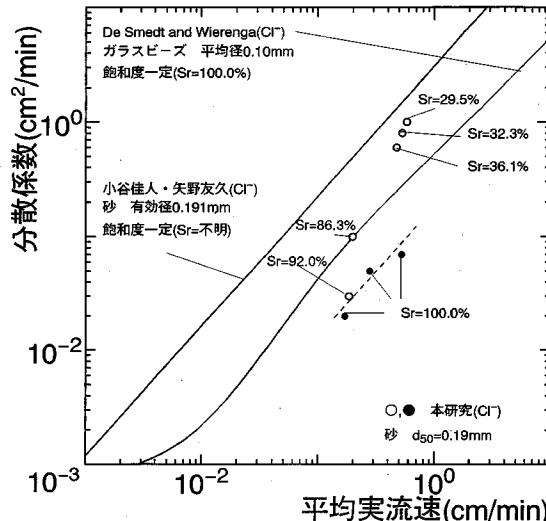


図-5 実流速と分散係数の関係  
(既往の研究結果は表-2 参照)

もの<sup>7), 10)</sup>を利用し、提案されている実流速と分散係数の関係式（表-2）と本研究の実験結果（黒丸・白丸）を比較した。図-5にその結果を示した。従来の研究成果によれば、両対数紙上での、分散係数と実流速の関係は、ある実流速以上ではほぼ平行な直線関係になっていることがわかる。この線上の飽和度は、不明のものもあるがそれぞれ同一である。本研究の飽和度100%での実流速と分散係数の関係（点線）もこれらの実線とほぼ平行な直線関係になっている。しかし、同一飽和度下での実流速だけによる影響を示した既発表の結果（実線）、および本研究の結果（黒丸）に較べて、異なる飽和度での分散係数を示す白丸の一連の傾向的变化は激しくなっていることがわかる。この傾向を図-6に詳しく示した。飽和度100%のままで実流速のみを大きくしてもある程度分散係数は大きくなる（点線）が、飽和度が小さくなる

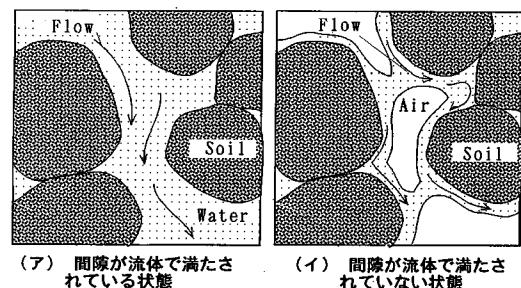


図-7 飽和・不飽和土中における間隙水の存在形態

ことによる分散係数の増大（実線）も明らかに認められる。本研究の実験結果には、実流速だけでなく、飽和度も大きな影響を与えていていることが明らかになった。

## （2）不飽和土中の分散現象に対する考え方

飽和度が低くなるほど分散係数が大きくなる要因として、(i) 不飽和流の場では、水分が fingering と類似した現象によって非常に不均質に流下するため見かけ上溶質の分散が助長される<sup>6)</sup>、(ii) 可動水・不動水間の物質移動が顕著になる<sup>7)</sup>、ことが指摘されている。本研究では、新たに飽和・不飽和の間隙水の存在形態から、飽和度が低くなるほど分散係数が大きくなる原因を考察する。

図-7に間隙水の存在形態のモデル図を示した。(ア)が間隙が流体で満たされている場合（飽和）、(イ)が間隙が流体で満たされていない場合（不飽和）である。(ア)と(イ)の間隙水分の存在状態が分散現象に及ぼす要因の違いを表-3にまとめた。図-7では横方向の分散<sup>19)</sup>も考えられるが、ここでは触れないこととする。

### a) 流路長・形状・変動性

図-7(ア)と(イ)で異なる点として間隙水の流路が挙げられる。飽和度が低くなると水は土粒子の表面に沿って流れ、流路が長く複雑になるため溶質の散らばり

表-3 飽和・不飽和土中における分散現象に寄与する要因

要因	飽和	不飽和
流路の長さ	短い	長い
流路の形状	簡素	複雑
流路の変動性	小さい	大きい
水圧	正	負

が大きくなる。図-7(イ)では不飽和状態下の土粒子が空気と接触していない状況になっているが、実験の際に、土粒子の表面が乾燥したり濡れたりを繰り返しているようですが透明カラムを通して見受けられた。また、 $\text{NH}_4^+$ の豊浦標準砂に対する吸着量を測定したところ、飽和・不飽和の土中水分量の多少による吸着量の違いはないこともわかっている。以上のことから不飽和帯では、間隙水の流路が刻々とその位置を変化させながら、最終的には土粒子表面を満遍なく濡らすように流动しているらしいことを指摘した<sup>9)</sup>。不飽和土中では流路が固定されて存在するのではなく変動しており、このことが低飽和度になるほど溶質の散らばりが大きくなる原因として指摘できる。

#### b) 空気の存在・水圧

不飽和状態では間隙中に空気が存在する点が重要である。図-7(イ)のように間隙に空気が存在することによって、水圧は相対的に負圧になり、土粒子付近でメニスカスが形成され、メニスカス部分に侵入した溶質は通常の間隙水中の溶質の移動と比べて、流れ主方向の移動に制動がかかる。この現象が不飽和土中でランダムに発生するため溶質の散らばりが大きくなると考えられる。

実際の不飽和土中では上記のような傾向が幾つも複合的に作用して、低飽和度になるほど不飽和帯での分散係数が大きくなっていると考えるのが妥当である。

## 7. 結論

不飽和砂層中の溶質の分散現象に着目し、空気吸引不飽和カラム試験を行って、一次元移流拡散方程式と破過曲線との比較から飽和度と分散係数の関係を調べた。本研究で得られた結論をまとめると次のようになる。

- (1) カラム下端での空気吸引によって、砂カラム内の飽和度分布を均一に保ちながら、不飽和帯における溶質移動実験が行えることを確認した。
- (2) 空気吸引の不飽和砂カラム実験から得られた  $\text{Cl}^-$  に関する実測破過曲線と一次元移流拡散方程式の解析解との fitting から、対応する飽和度における分散係数をダルシー流速一定の条件下において求めた。その結果分散係数を対数目盛、飽和

度を普通目盛とした片対数紙上で、飽和度が低くなるほど分散係数が大きくなる関係にあることを見いだした。

- (3) また、今回の実験で用いた原水濃度の範囲 ( $100 \text{ mg-N/l}$ ,  $1000 \text{ mg-N/l}$ ) では、濃度の違いによる分散係数への影響は認められず、両者の実験結果とも(2)の関係によって説明できた。
- (4) (2)におけるダルシー流速ではなく、実流速との関係について整理し直したところ、実流速の増加につれて分散係数が大きくなる従来からの傾向に加えて、実流速一定条件下で飽和度が低くなるほど分散係数が大きくなる傾向があることが確認できた。
- (5) 飽和度が低くなるほど分散係数が大きくなる原因について、不飽和状態の間隙水の流路が飽和状態に比較して長く複雑になる、流路自体が変動している、空気の存在により形成されるメニスカスの影響で溶質移動が拘束される、などの要因が新たに指摘できることを考察した。

## 参考文献

- 1) 各務原市地下水汚染研究会：各務原台地の地下水汚染－その原因究明と将来予測－、1991。
- 2) 吉田文和：ハイテク汚染、岩波新書、1990。
- 3) H.K. Krupp and D.E. Elrick : Misible displacement in an unsaturated glass bead medium, *Water Resources Research*, Vol.4, No.4, pp.809-815, 1968.
- 4) R.V. James and J. Rubin : Transport of Chloride ion in a water-unsaturated soil exhibiting anion exclusion, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol.50, pp.1142-1149, 1986.
- 5) R.V. James and J. Rubin : Accounting for apparatus-induced dispersion in analyses of misible displacement experiments, *Water Resources Research*, Vol.8, No.3, pp.717-721, 1972.
- 6) 佐藤邦明、村岡浩爾：不飽和浸透流における溶質分散係数の測定、土と基礎、Vol.33-2, No.1511, pp.45-50, 1985。
- 7) F. De Smedt and P.J. Wierenga : Solute transfer through columns of glass beads, *Water Resources Research*, Vol.20, No.2, pp.225-232, Feb., 1984.
- 8) M. Th. van Genuchten and P. J. Wierenga : Mass transfer studies in sorbing porous media, I, Analytical solutions, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol.40, pp.473-480, 1976.
- 9) 棚橋秀行、佐藤健、湯浅晶、宇野尚雄：Two-Regionモデルによる砂層中の溶質の輸送構造とパラメータ評価、土木学会論文集、No.499/III-28, pp.107-116, 1994.
- 10) 小谷智人、矢野友久：定常法による不飽和土壤の塩の分散係数測定について、鳥取大学砂丘研報、Vol.27, pp.1-7, 1988.
- 11) 玉井信行：密度流の水理、土木学会編・新体系土木工学、Vol.22, pp.12-30, 1980.
- 12) J.L. Conca and J. Wright : Diffusion coefficients in gravel

- under unsaturated conditions, *Water Resources Research*, Vol.26, No.5, pp.1055-1066, 1990.
- 13) B. L. Conkling and R. W. Blanchard : Calcium, Magnesium and Potassium diffusion coefficients in soil estimated from electrical conductance, *Soil Sci. Soc. AM. J.*, Vol.53, pp.1685-1690, 1989.
  - 14) E.A. Sudicky, R.W. Gillham and E.O. Frind : Experimental investigation of solute transport in stratified porous media 1. The nonreactive case, *Water Resources Research*, Vol.21, No.7, pp.1035-1041, 1985.
  - 15) 化学工学協会：物性定数5集，9. 拡散係数，p.205，丸善，1967.
  - 16) D.F. Yule and W.R. Gardner : Longitudinal and transverse dispersion coefficients in unsaturated plain-field sand, *Water Resources Research*, Vol.14, No.4, pp.582-588, 1978.
  - 17) 堀内将人, 井上 輝, 松下直幹, 吉田卓司:不飽和土壤の収脱着反応特性への含水率の影響に関する実験的検討, 土木学会論文集, No. 452, II-20, pp. 1-10, 1992.
  - 18) 長 智男, 田中 明:土壤中の塩の分散係数測定法, 鳥取大学砂丘研報, Vol. 20, pp.11-16, 1981.
  - 19) G.A. Robbins : Methods for determining transverse dispersion coefficients of porous media in laboratory column experiments, *Water Resources Research*, Vol.25, No.6, pp.1249-1258, 1989.

(1994.5.16 受付)

## SOLUTE DISPERSION IN UNSATURATED SAND COLUMN UNDER VACUUM

Hideyuki TANAHASHI, Takeshi SATO, Akira YUASA and Takao UNO

Dispersion coefficient was evaluated from laboratory measurements of solute transport through vertical sand column being applied air vacuum at the bottom. This study concluded that the applied vacuum is useful method to maintain the water saturation at a constant value throughout the column, and dispersion coefficient tends to increase with decreasing of water saturation.