数値計算による不飽和浸透水槽における 分散長の評価

EVALUATION OF DISPERSIVITY UNDER UNSATURATED CONDITION
BY NUMERICAL SIMULATION OF TRACER TEST IN THE SEEPAGE TANK

中川 啓¹・齋藤雅彦²・朝倉 宏³

Kei NAKAGAWA, Masahiko SAITO and Hiroshi ASAKURA

¹正会員 博(工) 長崎大学教授 大学院水産・環境科学総合研究科(〒852-8521 長崎市文教町1-14)

²正会員 博(工) 神戸大学助教 自然科学系先端融合研究環 重点研究部(〒657-8501神戸市灘区六甲台町1-1)

³博(工) 長崎大学准教授 大学院水産・環境科学総合研究科(〒852-8521 長崎市文教町1-14)

It is important to apply proper dispersivity in unsaturated condition when solute transport near the soil surface is assessed. However data on unsaturated dispersivity are limited because dispersion in unsaturated condition is more complicated than in saturated condition. In the previous study, we tried to evaluate unsaturated-dispersivity by tracer experiment in the laboratory seepage tank. However, it was difficult to investigate clear results because observed values were scattered. In this study, numerical tracer simulation was conducted under unsaturated water flow condition. The numerical tracer simulation results were confirmed that longitudinal and transverse dispersivities have dependency on soil water content. When the water content is lowered, dispersivity becomes larger. The ratio of transverse dispersivity to longitudinal dispersivity was in the range of 1/1000-1/6000. Numerical results showed that longitudinal dispersivity may have almost constant value in the small scale as seepage flow tank used in this study.

Key Words : *dispersivity, unsaturated condition, numerical-tracer experiment, convective-dispersive equation, breakthrough curve*

1. はじめに

土壌中や地下水における物質輸送を規定する重要なパラメータの一つに分散長がある。特に、農用地における肥料成分の移動や市街地における汚染物質の移動などの地表面近傍での物質輸送では、不飽和条件下での分散長の評価が重要となる¹⁾。しかし、飽和条件下における分散長の評価に比べ、土壌水分量に依存するなど²⁾、そのメカニズムが複雑であるため、十分に検討されてきたとは言えない。著者らは、水平浸透水槽を用いて、水平な地下水流れとその直上をひとまとめた巨視的な不飽和領域において、任意の水頭勾配および体積含水率の条件下で、トレーサー試験を行い、トレーサー投入点下流側の各点で得られた破過曲線から縦および横方向の分散長を評価することを試みている³⁾。その結果、縦方向および横方向分散長の体積含水率依存性と、体積含水率

が低下すると縦方向分散長が大きくなる傾向にあることを確認した。また縦方向分散長が流下距離に応じて大きくなる傾向があることを示した。しかし、実験結果が大きくばらついていたことや、限られた実験ケースにより評価された結果であった。そこで本研究では、文献³⁾における実験結果を補完することや結果の検証を目的として、実験と同様の不飽和条件下における分散長の評価について、数値実験的に検討した。すなわち、水平浸透水槽における3次元数値解析の結果を、鉛直方向に断面平均して、体積含水率と分散長を評価した。

2. 室内実験の概要³⁾

実験装置の概要を図-1に示す。浸透層部分は、縦80 cm、横50 cm、高さ10 cmとし、浸透層内には平均粒径

図-1 実験装置の概要³⁾

1.2 mmのガラスビーズを、密度 1.58 g cm^{-3} となるように充填した。浸透層部分の両側にはスクリーンを介してタンクを接続し、それぞれにオーバーフローにより水位を固定するための任意の高さに設定できる排水パイプを設けた。上流側のタンクには、イオン交換水を注水するようにした。浸透層の上蓋には、上流側に注入孔を設け、その位置から下流側に向かって上蓋中央部に、10 cmごとに5点観測点を設け (No.1~5)、静電容量式の土壌水分・電気伝導度計を鉛直に挿入・固定できるようにした。この静電容量式センサーは、浸透層内の部分の長さが6.7 cmで、水槽の鉛直方向 (深さ方向)の値の代表値を取得できると考えた。トレーサー注入孔は、金網を巻いた直径5 mmの多孔パイプとして、シリンジにより水槽上面から下面まで一様にトレーサーが投入できるようにした。実験は以下の手順で行った。トレーサー注入孔から塩化カリウムを 0.7 g l^{-1} の濃度でシリンジを用いて60 mlを瞬間投入した。トレーサーの瞬間投入の後、各観測点における土壌水分と電気伝導度を1分ごとに測定した。

3. 数値計算モデル

(1) HYDRUS2D/3Dによる数値計算の概要

本研究では、米国農務省塩類研究所において開発された土中水分・溶質移動予測汎用プログラムであるHYDRUS2D/3D⁴⁾を用いて数値計算を実施した。本汎用プログラムは、欧米を中心に農学分野で精力的に用いられており、様々な現象への適用事例も多く広く用いられている。HYDRUS2D/3Dは、水の流れはRichards式、溶質移動は移流分散方程式に基づき、それぞれガラーキン

図-2 水分特性曲線 ($n=4.864$, $\theta_s=0.341$, $\theta_r=0.0249$, $\alpha=0.446$)

有限要素法によって計算される。

(2) 計算条件および計算に用いた諸条件

実験における浸透水槽の横幅は50 cmであるが、計算領域を節約するため30 cmとした。計算領域の幅を30 cmとすることは、実験結果および予備的な数値計算によると、トレーサーの横方向の拡がりに影響しない。深さ方向は10 cmを1 cm毎の11 レイヤーとした。空間の離散化は、ガラーキン有限要素法により、格子点間隔が1 cmになるように三角形要素で構成した。各レイヤー上の観測点位置で濃度を求め、全レイヤーの値を平均して、観測点の濃度 (断面平均濃度) とした。

初期条件は、後に示す実験・数値計算ケースの水頭を上下流に設定し、それ以外の領域は、下流側と同じ水頭分布を与え、浸透流を計算して得られた圧力水頭の定常値を与えた。濃度の初期条件は次のようにした。まず、注入した瞬間のトレーサーの拡がりを実測したところ、半径6 cmの円であった。この円に入る三角形要素に対して、有効空隙率を40 %と仮定して実験時に注入したKClの量 42 mgから濃度を計算すると、 0.95 g l^{-1} となった。この濃度の1/3を円内の三角形要素の接点上に与えた。その結果、ほぼ同心円状の初期分布が得られており、これを濃度の初期分布とした。

境界条件は、上下流は圧力水頭について、固定水頭境界で、濃度については、第3種の境界条件とした。その他の面は圧力水頭および濃度について、フラックス無しの条件とした。

本研究では、飽和-不飽和浸透流解析を行うので、不飽和パラメータが必要である。ここでは、van Genuchtenのモデル (VGモデルとする) を適用し、カラムを、実験に用いたガラス球で充填し、土柱法により排水試験デ

表-1 実験・数値計算ケース

水位	Ex1	Ex2	Ex3	Ex4	Ex5
上流側	3.7 cm	5.3 cm	6.9 cm	8.5 cm	11.0 cm
下流側	3.1 cm	4.7 cm	6.3 cm	7.9 cm	10.4 cm

図-3 トレーサー輸送の数値計算結果例 (左) 濃度分布, (右) 体積含水率分布 (Ex2, トレーサー注入 1008 s 後)

図-4 破過曲線の数値解と実測値の比較 (観測点 No. 3)

ータを得て、非線形最小自乗法により、パラメータの同定を行った。得られたパラメータは、 $n=4.864$, $\theta_s=0.341$, $\theta_r=0.0249$, $\alpha=0.446$ である。図-2に得られた結果と同定したパラメータによる水分特性曲線を示す。用いたガラス球は、平均粒径が比較的大きく、排水試験による特性曲線は、図のような結果であった。飽和透水係数は、室内試験により決定した値を基に、前報³⁾の実験結果を再現できるように調整を行い決定し、 $k_s=1.56$ cm/sとした。ガラス球の微視的分散長は、縦方向が0.216 cm, 横方向をその1/10である0.0216 cmとした。この縦方向の微視的分散長は、ガラス球の平均粒径1.2 mmとして、Bearの分散係数に関する式⁵⁾より算定した。

(3) 数値計算ケースと数値計算の妥当性

ここでの数値計算ケースは、前報³⁾の実験ケースにならない、飽和から不飽和にかけて、5段階の水位で、上下流の水頭差はいずれも0.6 cmとした。数値計算は、3600 sまで実施した。また計算上、注入点から60 cmの位置にも観測点を設けた。表-1に実験・数値計算ケースをまとめている。

図-3に数値計算結果の一例として、Ex2のトレーサー注入1008 s後のプリュームの様子と体積含水率の分布を示す。結果は、浸透水槽の中央を通る平面による断面図として示す。水槽下部の飽和帯において、トレーサーの

輸送が先行し、不飽和帯である上部で遅れていることが明らかになった。すなわち、水分量の多い部分を選択的に流下し、逆に水分量の少ない部分を迂回するように流下することで、浸透層スケールで見た場合の巨視的分散が見掛け上、大きくなると考えられる。このようなメカニズムにより、分散長の大きさは水分量に依存すると考えられる。

図-4に、すべてのケースに対する観測点No.3における破過曲線の実験結果³⁾と鉛直方向に断面平均した数値計算結果を比較して示す。なお観測点No.3は、トレーサー注入点から30 cmの位置である。全てにおいて適合性が高いとはいえないが、破過曲線の形状やピークの値など、数値計算結果は、概ね実験結果を再現しているといえ、数値計算方法のほぼ妥当性が確認されたと考える。

(4) 数値計算結果から分散長の評価方法

前報³⁾と同様に以下の様に考え、鉛直方向に断面平均した数値計算結果から分散長の評価を行った。平面2次元の物質輸送方程式は、移流分散方程式で与えられる。一定速度の流れ方向をx軸に一致させて、かつ対象としている物質が固相へ非吸着性であるとすれば、次式のようになる⁶⁾。

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} + u \frac{\partial \theta C}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 \theta C}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 \theta C}{\partial y^2} \quad (1)$$

図-5 平均体積含水率の分布

図-7 体積含水率に対する縦方向分散長

ここで C は物質濃度, $u (>0)$ は間隙流速, θ は体積含水率, t は時間, 縦方向分散係数 $D_L = \alpha_L u$ および横方向分散係数 $D_T = \alpha_T u$ である. α_L は縦方向分散長, α_T は横方向分散長である. なお時空間にわたって体積含水率が変化しなければ, 結局次式のようになる.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (2)$$

この基礎式に対して, 帯水層が xy の正負の両方向に無限遠まで広がっていると仮定し, C_0 の濃度のトレーサーを時刻 $t=0$, 場所 $x=0, y=0$ において瞬間投入した場合の解析解は次式で与えられる.

$$C = \frac{C_0}{4\pi u \sqrt{\alpha_L \alpha_T t}} \exp\left(-\frac{(x-ut)^2}{4\alpha_L ut} - \frac{y^2}{4\alpha_T ut}\right) \quad (3)$$

この解析解が実測値によくあうように α_L と α_T を非線形最小自乗法により求めた. なお, 上下流で水位差をつけているので, 厳密には空間的に体積含水率が一定とは言えないが, 式(2)を基礎式とすることの妥当性は, 次のように考えた. 図-5に, 断面平均の体積含水率を観測点ごとにプロットして, すべての数値計算ケースについて示す. 上流側から下流側へ向かい, 水位が低下するため, 確かに水分量は低くなっていることが分かるが, その減少量

図-6 数値計算によるトレーサーの分散と解析解のフィッティング (Ex2)

はわずかであり, それぞれの数値計算ケースにおいて, 体積含水率はほぼ一定であると考ええる.

図-6に, 一例として, Ex2の場合の数値計算によるトレーサーの分散と解析解のフィッティング結果について示している. 上流側から順に濃度が立ち上がりピークに到達することとピーク濃度が注入点から遠方になるに従い低減することが分かり, 正しく計算されたことが窺える.

4. 分散長評価結果と考察

図-7には, トレーサー注入孔からの距離毎にまとめた体積含水率と評価された縦方向分散長をプロットしている. プロットした値は, 観測点のみで評価した値であり, その点までの値は考慮していない. 実験³⁾のデータをまとめた場合より, バラツキは少なくなった. トレーサー注入位置からの距離が, 10~30 cmの場合に, 近似曲線をプロットした. その傾向は, 体積含水率が大きくなると, 縦方向分散長が小さくなる傾向にあり, これらは従来の知見とも相違せず(例えばToride et al.の実験結果²⁾), 実験結果とも整合する結果が得られた. 間隙空気の増加が, 水とそこに溶存している物質の移動を妨げる確率を高め, 移動しやすい部分と移動しにくい部分の差が大きくなることがその一因と考えられる. 体積含水率が大きくなると, 巨視的に評価しているのだから, 完全には一致しないものの, 数値計算で与えた縦方向の微視的分散長 (0.216 cm) に近づいている. トレーサー注入位置から40~60 cmの場合は, 体積含水率が低いケースで分散長が特に小さく評価された. この原因は, 水分量の低い浸透水槽上部におけるトレーサーの輸送が極端に遅延し, 観測点で断面平均された破過曲線が, 到達の早いものと遅いものの2つのピークや長いテーリングを持つようになり, 先行しているピークへのフィッティングにより評価されてしまったためと考えられる. 一例としてEx1の観測点No.6 (トレーサー注入点から60 cm)における破過曲線を図-8に示す. 今回の解析解による評価は, 数値解の2つめのピークとテーリングをとらえきれていない. このような場合への評価方法は, 今後検討しなければなら

図-8 Ex1の観測点No. 6での破過曲線 (ana:解析解, num:数値解)

図-9 体積含水率に対する横方向分散長

図-10 体積含水率に対する縦方向分散長と横方向分散長の比

図-11 流下距離に対する縦方向分散長

ない。ピークが分かれるような場合でも、それらを含むする曲線の裾幅は、水分量の上昇により狭くなる傾向にあり、10～30 cmにおける水分量に対する分散長の関係と一致する。

図-9には、トレーサー注入孔からの距離毎にまとめた体積含水率と横方向分散長および近似曲線をプロットしている。実験³⁾と同様、全体的にかなり小さく評価され、縦方向分散長と同様、土壌水分量が少なくなると横方向分散長が大きくなる傾向が確認できた。

図-10には、トレーサー注入孔からの距離毎にまとめた縦方向分散長と横方向分散長の比および近似曲線をプロットしている。実験³⁾と同様、横方向の分散長が小さく評価された。実験では、横方向分散長/縦方向分散長の値は、1/100～1/1000の範囲に分布したが、今回の数値計算によると、1/1000～1/6000の範囲となり、縦方向が横方向に比べ、より大きくなるような結果となった。ま

た体積含水率が大きくなると横方向に対する縦方向の分散長の比も大きくなる傾向にある。これは実験結果³⁾とも整合する結果であり、水分量が多いと、縦方向の輸送がより促進されることを示している。

図-11には、トレーサー注入点からの距離に対する縦方向分散長とその近似曲線をプロットしている。すべてのケースで、流下距離に応じて縦方向分散長は小さくなる傾向の存在が示唆された。この低下傾向の勾配は不飽和度の大きいケースであるEx1で特に大きい。これは図-8を示して説明したように、水分量が低いケース(特にEx1)では、解析解により正しく評価できず、分散長を特に小さく求めてしまったことが原因である。したがって低下傾向の勾配は、本来ここまで大きくはならないと考えられる。Ex3からの飽和度の大きいケースでは、低下傾向の勾配は小さくなく、この浸透水槽程度の範囲では、ほぼ一定であるとみてよいと考えられる。実験結果³⁾か

図-12 流下距離に対する横方向分散長

らは、距離に対して低下傾向もあるが、全体的な傾向は増加傾向で、スケール効果を示したと結論づけたが、今回の数値計算では、その傾向は見られなかった。

図-12には、トレーサー注入点からの距離に対する横方向分散長とその近似曲線をプロットしている。距離に応じて小さくなる傾向が見られた。トレーサー注入点から30 cm以降は一定値に収束していくように見え、この傾向は実験結果³⁾とも一致した。実験³⁾では、トレーサーをシリンジを用いて瞬間的に注入したため、注入直後は注入点で同心円状にトレーサープルームが広がった。今回の数値計算でも、同様の状況からの計算を実施した。そのため、初期の横方向への拡がりが大きめに生じ、その後距離を経て落ち着いたと考えられる。

図-13には、トレーサー注入点からの距離に対する縦方向分散長と横方向分散長の比とその近似曲線をプロットしている。飽和度の低いEx1とEx2以外のケースでは、ほぼ一様に距離に応じて縦方向と横方向の分散長比が大きくなる傾向にある。飽和度が低い場合は、水分量が低く縦方向への広がりあまり進まなかったからと考えられる。

5. おわりに

本研究では、中川³⁾が実施した、水平浸透水槽を用いた不飽和状態の流れ場における、室内トレーサー試験に対して、数値計算により再度、分散長の評価を行うことを試みた。分散長の評価は、実験³⁾と同様、実測値への非線形最小自乗法による解析解のあてはめにより行った。その結果、縦方向および横方向分散長の土壌水分量依存性を確認した。実験³⁾と同様に、水分量が低下すると縦方向分散長が大きくなる傾向にあることを確認し、

図-13 流下距離に対する縦方向分散長と横方向分散長の比

そのメカニズムは、間隙空気が増加が、水とそこに溶存している物質の移動を妨げる確率を高め、移動しやすい部分と移動しにくい部分の差が大きくなることでであると考えられる。また今回の数値計算結果からは、横方向分散長/縦方向分散長は1/1000~1/6000 に分布し、実験結果³⁾よりもより縦方向の分散が大きい結果となった。実験結果³⁾からは、流下距離に対する不飽和分散長の増加傾向があることが示唆されたが、本研究の数値計算結果からは、その傾向は見られず、わずかな低下傾向であり、むしろ一定であるようであった。対象とした浸透水槽程度の規模では、不飽和の分散長におけるスケール効果は見出されないと考えられる。

参考文献

- 1) 坂本 康, 穴水大介, 平山公明, 熱田洋一, 西田 継: 表層不飽和土壌層での溶質移動パラメータの空間分布特性と観測スケールの影響, 水工学論文集, Vol.47, pp.301-306, 2003.
- 2) Toride, N., Inoue, M. and Leij, F.J.: Hydrodynamic dispersion in an unsaturated dune sand, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol.67, pp.703-712, 2003.
- 3) 中川 啓, 中川原尚子, 齋藤雅彦: 水平浸透水槽を用いたトレーサー試験による不飽和分散長の評価, 水工学論文集, Vol.54, pp.595-600, 2010.
- 4) Simunek, J., van Genuchten, Th. and Sejna, M.: *The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media Technical Manual Version 1.0*, 2006.
- 5) Bear, J.: *Dynamics of Fluids in Porous Media*, American Elsevier, 1972.
- 6) Kinzelbach, W.: パソコンによる地下水解析, 上田年比古監訳, 森北出版, pp.181-182, 1990.

(2011. 9. 30受付)