

飽和多孔媒体中のフィンガリングによる DNAPL 鉛直輸送に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON DNAPL VERTICAL MIGRATION BY FINGERING IN SATURATED POROUS MEDIA

佐々木 孝¹・佐藤 邦明²

Takashi SASAKI and Kuniaki SATO

¹正会員 (株) アーク情報システム (〒102-0076 東京都千代田区五番町4-2)

²正会員 工博 埼玉大学教授 地圏科学研究センター (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)

Dense Non Aqueous Phase Liquids (DNAPLs) are common sources of groundwater contamination in the subsurface where they remain entrapped within the pore space and dissolved in aqueous phase during long term. In this study a new experiment to predict the entrapped DNAPL is introduced and their results are reported. Three types of randomly packed glass beads with different diameters (1, 2, 3mm) were used on fingering penetration of TCE (trichloroethylene) into saturated porous media to evaluate two main parameters governing with DNAPL transport and entrapment within pores. The results suggest that the first parameter; the relative permeability coefficient (k_D) accounting for fingering, is related to finger Reynolds number ($w d/\nu$) and the second parameter; the entrapment rate coefficient κ [T^{-1}] ranged from 1.2×10^{-2} to 7.3×10^{-2} (sec^{-1}) and proportional to the ratio of the Reynolds number to the intrinsic permeability. The one-dimensional numerical computation with those parameters is used to compare with the experimental results.

Key Words : DNAPL, fingering, saturated porous media, entrapped effect, laboratory experiment

1. はじめに

トリクロロエチレン(TCE)のような揮発性有機化合物は、非水溶性、あるいは難溶解性(Non-Aqueous Phase Liquid: NAPL)の性質を持ち、密度により水より軽い場合に LNAPL(Light NAPL), 重い場合に DNAPL(Dense NAPL)と分類される。DNAPL は処理や漏洩により地表面から浸入して汚染源となるが、水溶性物質とは異なる複雑な挙動を示す。多孔媒体中で単一の液滴、あるいは連鎖として存在し、重力沈降、分散、移流などにより移動する部分(mobile)と、空隙内に捕捉され拘束される部分(immobile, 残存 DNAPL)に分けられる。

このような DNAPL の土壌・地下水中の挙動解析、移行過程の解明は、汚染の予測や浄化対策の立案に不可欠であり、近年注目される分野の一つとして、現状と課題がレビューされている (Mercer and Cohen, 1990¹⁾; Miller et al., 1998²⁾).

著者らは先に、ランダムウォーク法をもとに DNAPL 原液を重力沈降する液滴粒子の運動として表現し、粒子が空隙内に拘束され残留する過程をモデル化して、高精度 TVD(Total Variation Diminishing)差分スキームによる DNAPL 溶液の移流分散方程式

と組み合わせた、新しい DNAPL 移行解析手法を提案した^{3), 4)}。本研究は、構築中の手法で用いた空隙内に残存する DNAPL 量推定モデルの実験による基礎付けを意図している。

多孔媒体中に浸入し、液滴の形で捕捉された NAPL は、形が不規則で、多くは枝分かれ、引き伸ばなどの形状を持つ(Khachikian and Harmon, 2000⁵⁾). Conrad et al. (1992)⁶⁾ は、飽和多孔体中の空隙に捕捉された有機化合物の形状を実験により可視化し、一つの間隙を占める単一球から、複数間隙中の複雑な枝分かれした液滴連鎖まで、100 μm から 1mm 程度の様々な大きさと形を持つ不連続な液滴の集合であることを示した。Geller and Hunt (1993)⁷⁾ は、捕捉された LNAPL のカラム溶解実験から、NAPL 液滴を孤立し溶解によって縮む「球」としてモデル化し、物質輸送係数を求めている。Powers et al. (1994)⁸⁾ は、砂媒体に捕捉された NAPL 液滴の非定常溶解を表現する式を導き、多孔媒体の粒径分布が、捕捉された液滴の形状と分布を表すパラメータとして有効であることを示した。伊藤、川端(2003)⁹⁾は2次元土槽実験から DNAPL の残留飽和度を求め、その値を 10~15%としている。

また、飽和多孔体に浸透する DNAPL に特徴的な

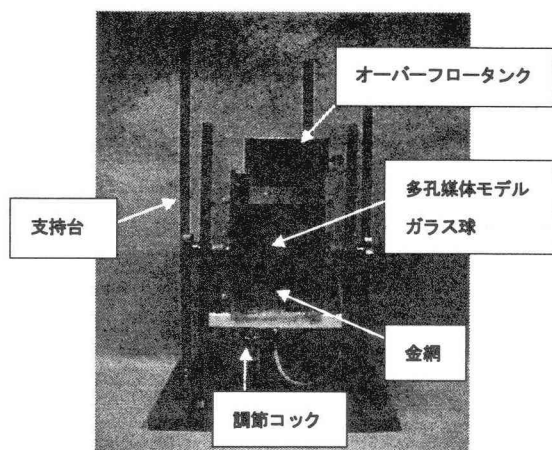


図-1 実験装置

挙動であるフィンガリングについては、次のような研究がある。

Imhoff et al. (1996)¹⁰⁾ は、DNAPL による実験を行い、線形安定性解析をもとに、フィンガリングが溶解フロントからの不安定性により発生することを示した。Trantham and Durnford (1999)¹¹⁾ は、フラクタルの一種である DLA (Diffusion-Limited Aggregation: 拡散に支配された凝集)によりフィンガリング形状を粒子の連鎖として現象的に近似した STAG (Stochastic Aggregation)モデルを示した。Zhang and Smith (2001)¹²⁾ は、実験にもとづいて、フィンガーの本体を動く「コア」と付帯の「鞘」からなる Mobile-Immobile-Zone(MIZ)モデルを提案し、フィンガーの動的構造を明らかにした。上野ほか(2003)¹³⁾ は、ランダム充填場におけるフィンガリング実験を行い、フィンガーの有効径比(移動部と不動部の径比)とフィンガー-Re 数との関係を求めた。

これらのことから、多孔媒体中に捕捉されている DNAPL は、(i)間隙空間の大きさに対応した様々な単一液滴、連鎖、枝分かれとして存在している、(ii)難溶解性相から液相への物質輸送について、液滴の球による近似をもとに、物質輸送(率)係数が得られている、(iii)フィンガリングは溶解フロントの不安定性から起こり、液滴連鎖や枝分かれの形状を持ち、移動部分と不動部分に分けられる、(iv)フィンガリング実験により得られた不動部分のパターンは、残存 DNAPL 自身であるが、その量的把握、推定に注目した研究は少なく、浄化対策や予測の上からも重要な課題であると考えられる。

本研究では、ガラス球による多孔媒体モデルを用いてフィンガリング実験を行い、ダルシー則にもとづく鉛直浸透速度の補正係数と、残存量を支配するパラメータの値を求める。残存量の基礎方程式にこのパラメータを使用して数値実験を行い、仮定した残存量推定モデルの妥当性を確認する。

2. 実験装置と実験方法

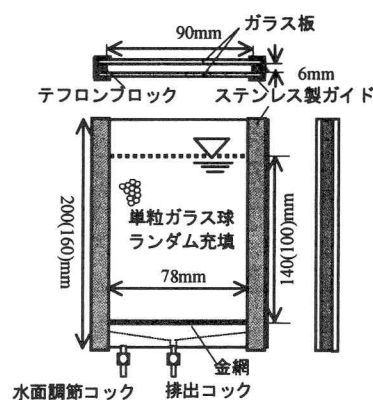


図-2 多孔媒体供試体

表-1 実験条件

ランダム充填多孔媒体モデル(供試体) (10 ⁻³ m)				浸透 DNAPL
球粒子直径	幅	長さ	奥行き	
1.0	90	140/100	6	TCE
2.0		140		
3.0				

実験装置を図-1に示す。装置に単粒ガラス球をランダム充填し、デジタルビデオカメラを用いて画像を記録しPCにより処理、解析を行った。

多孔媒体モデルは、図-2に示すように幅 90mm、長さ 200(160)mm、厚さ 3mm の2枚のガラス板を奥行き 6mm となるようテフロンブロックで挟み、シール剤で防水した。単粒ガラス球を上部から充填した後、下部から水を注入して飽和した。ガラス球の直径は 1, 2, 3mm の3種である。表-1に多孔媒体の条件を示した。1mm のガラス球は、供試体長を 100, 140mm の2種とした。DNAPL はトリクロロエチレン(TCE)を使用し、溶油性スカーレットで赤色に着色して、20cm³の注射器によりガラス板を伝わせて徐々に注入にした。TCE は一定の深さになると浸入を開始する。フィンガリングが開始した時点で注入を止め、フィンガリングが終了し、注入された DNAPL が落下して下部に滞留してから一定時間後(5 分程度)に排水コックを開いて流出量を計測した。注射器中の残量から注入量を読み取り、残存 DNAPL 量と限界貯留深さを算定した。デジタルビデオカメラに実験の進行を記録し、画像からフィンガーの鉛直浸透速度を求めた。

3. 残存量を考慮した移流分散方程式

DNAPL 残存量のモデル化にあたり、DNAPL の単一成分を対象とし、多孔媒体は均一であり空隙率 ε も一定であると仮定する。DNAPL 原液を移動/不動性(mobile/immobile)で分け、mobile部を原液 DNAPL、immobile部を残存 DNAPL と呼ぶこととする。

残存量は、濁水、コロイド、微生物など水中の懸濁質ろ過の概念(Yao et al., 1971¹⁴⁾; Rogers and Logan, 2000¹⁵⁾; Tufenkji et al., 2003¹⁶⁾) に準じて支配方程式

を構成した。本モデルは DNAPL 原液の多孔媒体空隙内拘束を現象的に近似するものである。

図-3(a)のような多孔媒体モデルにおいて、単位コントロールボリュームあたりの原液 DNAPL 量を濃度で、残存 DNAPL 量を体積率で表すことにする。DNAPL 保存式を(1)に、 w の定義を(2) 式に、残存 DNAPL 量の定義を(3) 式に示す¹⁶⁾。ある点 z における残存量が、その点の濃度に比例するという関係にもとづく。

本モデルでは DNAPL の難溶解性と現象の時間スケールから DNAPL 溶液は対象から省いている。

$$\frac{\partial C \theta_a}{\partial t} + \rho_n \frac{\partial \theta_e}{\partial t} + w \frac{\partial C \theta_a}{\partial z} - D \frac{\partial^2 C \theta_a}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

$$n_{eD} \cdot w = W_d \quad (2a)$$

$$W_d = k \cdot k_D \left(\frac{\xi + h_0 + \xi_c}{\xi} \right) \quad (2b)$$

$$\rho_n \frac{\partial \theta_e}{\partial t} = \kappa \cdot C \theta_a \quad (3)$$

ここで、 $\theta_a(x,t)$ 、 $\theta_e(x,t)$ ：原液および残存 DNAPL 体積率(ただし $n_{eD} = \theta_a + \theta_e$)、 $C(x,t)$ ：DNAPL 濃度(g/m^3)、 ρ_n ：DNAPL 密度(g/m^3)、 w ：鉛直浸透(フィンガリング)速度(m/s)、 D ：分散係数(m^2/s)、 W_d ：ダルシー速度(m/s)、 k ：DNAPL 浸透係数(m/s)、 k_D ：補正係数(無次元)、 ξ ：鉛直経路長(m)、 h_0 ：限界貯留深さ(m)、 ξ_c ：DNAPL 毛管圧力相当水頭(m)、 n_{eD} ：動的な有効空隙率(無次元)である。 k_D は DNAPL と水との密度差、表面張力、フィンガリング形状係数を含む補正係数であり、 n_{eD} は $H \cdot B \cdot n_{eD}$ がフィンガー断面積を表す。

(3)式のパラメータ κ は残存量を支配するものであり、ここでは、 κ を空隙内拘束率係数 [T^{-1}]、 λ を $\lambda = \kappa/w$ と定義して、空隙内拘束係数 [L^{-1}] と呼ぶこととする。

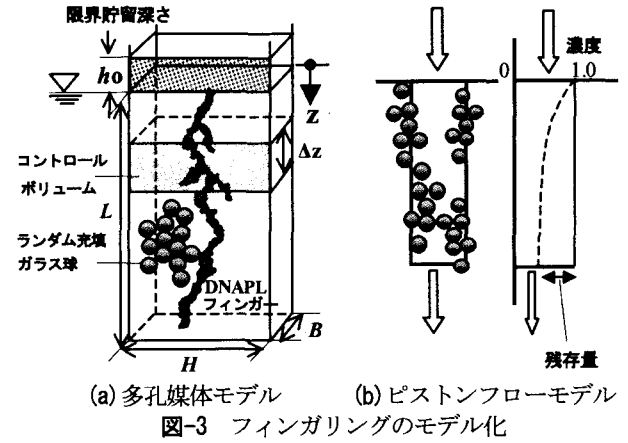
(1)式の第2項を κC で表した式は、 κC を消滅(シンク)項として吸着、減衰などの表現に一般的に用いられる。本論の基礎式系では(1)式中の $\rho_n \partial \theta_e / \partial t$ 項と消滅項 κC との関係から残存量の分布を求める。

定常で分散がない場合、(1)式で $C' = C \theta_a$ とすると次の(4)式となり、 $z=z_0$ で $C' = C'_0$ の境界条件を与えて解くと、(5)式が得られる。

$$w \frac{dC'}{dz} + \kappa C' = 0 \quad (4)$$

$$C'(z) = C'_0 \exp(-\kappa/w \cdot z) \quad (5)$$

フィンガリングを単純化して、ピストンフローモデルで表現する(図-3(b) 参照)。単位流入量に対して流出量(移動部)と残存量(不動部)の和は等しい。本実験では、上述のように TCE(移動部)はフィンガー状に多孔媒体を通過して下部に落下するから、ここで、定常状態を設定した(たとえば、フィンガーの先端が下方境界に到達した時点の濃度分布)、近似的に(5)式が成り立つとすると、流出量と残存量が図-3(b)のように表される。



(a) 多孔媒体モデル (b) ピストンフローモデル
図-3 フィンガリングのモデル化

本論では、残存量の定式化のために、その前提として仮想的な定常状態について検討する。点 z における T_0 時間後の残存量は、濃度分布の定常性を仮定すれば、(6)式ようになる。

$$\int_0^{T_0} \rho_n \frac{\partial \theta_e}{\partial t} dt = \kappa T_0 C'(z) = \kappa T_0 C(z) \theta_a \quad (6)$$

$$\approx \kappa T_0 n_{eD} C(z) = \kappa T_0 n_{eD} C_0 \exp(-\kappa/w \cdot z)$$

したがって、DNAPL の流入、流出量(g)を Q_{in} 、 Q_{out} 、多孔媒体全体における残存量を $\Delta Q (= Q_{in} - Q_{out})$ とし、 $A = H \cdot B$ 、 $A \cdot L \cdot n_{eD} C_0 = Q_{in}$ と $L = w \cdot T_0$ の関係を用いれば、 ΔQ は次のように表せる。

$$\begin{aligned} \Delta Q &= A \cdot \int_0^L \int_0^{T_0} \rho_n \frac{\partial \theta_e}{\partial t} dt dz = \\ &= A \cdot \kappa T_0 n_{eD} C_0 \int_0^L \exp(-\kappa/w \cdot z) dz \\ &= A \cdot L n_{eD} C_0 [1 - \exp(-\kappa/w \cdot L)] \\ \therefore \Delta Q &= Q_{in} [1 - \exp(-\kappa/w \cdot L)] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{したがって、} \kappa = \frac{w}{L} \log \left(\frac{Q_{in}}{Q_{out}} \right) \quad (8)$$

一方、 κ は平均粒径 d 、空隙率 ε 、係数 η を用いて(9a)式のように定義される^{14), 15), 16)}。 κ は、単位体積中の媒体粒子数 $(A \cdot \Delta z (1-\varepsilon) / (\pi d^3/6))$ に、媒体粒子の断面積 $(\pi d^2/4)$ を乗じたパラメータ $3(1-\varepsilon)/2d$ と、粒子への付着、脱着を表す係数 η および流速 w との積の形で表される。

さらに、粒径 d と空隙径 δ との関係 $d = \alpha \delta$ を用いると、空隙単管モデルにもとづく浸透係数の表現 ($k = \delta^2 \rho g / 32 \mu$, $K = \mu k / \rho g$) (佐藤, 岩佐, 2002)¹⁷⁾ から、 κ は次の(9b)式のように表せる。ここで、 α は係数で、たとえば、粒径 d の球から構成される最大空隙の場合 $\alpha = (\pi/(6-\pi))^{1/3}$ はほぼ 1.0、最小空隙の場合 $\alpha = (\pi/(6-\sqrt{2}\pi))^{1/3}$ はほぼ 1.26 となる。 ζ は α などの空隙形状に関わる係数、 μ は DNAPL の粘性係数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)、 ν は動粘性係数 (m^2/s)、 K は固有浸透係数 (m^2) である。

$$\kappa = \frac{3(1-\varepsilon)}{2d} w \eta \quad (9a)$$

$$\kappa = \gamma \frac{\nu \text{Re}}{K}, \quad \gamma = \frac{3}{2} (1-\varepsilon) \eta \zeta \quad (9b)$$

(8)式をもとに、実験から得られた Q_{in} 、 Q_{out} 、 L 、 w 、 T_0 から κ を求め、(9)式にもとづいて結果を考察する。

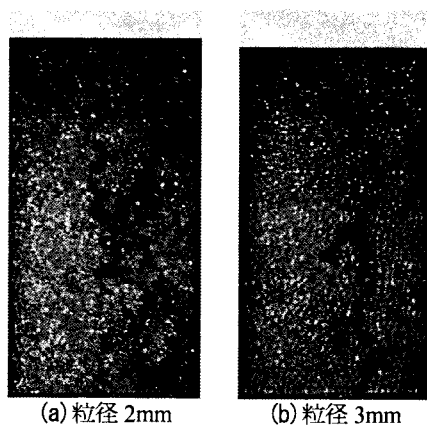


図-4 フィンガーパターン

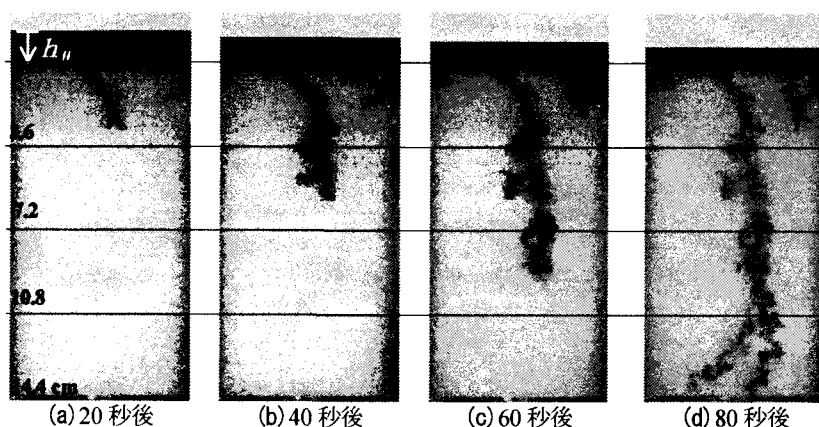


図-5 フィンガリング進行過程 (粒径 1mm, L=140mm)

4. 実験結果と考察

(1) 多孔媒体モデルの特性

実験に使用した多孔媒体の特性を表-2 に示す. 固有浸透係数は, 透水係数の実測値から求めた値と, Kozeny-Carman の式によるものとを示した.

(2) 鉛直浸透速度と限界貯留深さ

実験で得られた各ケースのフィンガリング速度 w , 落下時間 T_0 , 限界貯留深さ h_0 の値を表-3 に示す. フィンガリングの形態は, 1本のフィンガーのみが発生する, 2本に枝分かれする, 分かれた後に更に合流して1本になる, 全面から一斉に落下するなど, いくつかの場合が見られた(図-4(a), (b)参照). デジタルビデオに記録したフィンガーの浸透プロセス例を図-5(a)-(d)に示した. h_0 は, 傾向としては粒径が小さいケースの値が大きい, 各 Run でばらつきがある. 粒径が 1mm で供試体が 100mm のケースは, 140mm の場合と異なった傾向を示した. 供試体の性質, 充填方法の影響などによる多孔媒体特性の差から生じたと考えられる.

実験で計測した T_0 , h_0 , 供試体長 L , n_{eD} をもとに w を求め, (2)式から, 補正係数 k_D の値を得た. なお, (2)式で毛管圧力成分は 0 とした. w は上野らの実験 ($w=0.20$) とほぼ同様の結果が得られた. k_D については, 本実験結果は上野らの結果と比べて粒径 1mm の場合はほぼ 2 倍, 2, 3mm のケースは最大で 1 オーダー大きい. n_{eD} は上野らの仮定 ($n_{eD}=0.04, 0.05$) と比べてわずかに大きい.

w と粒径からフィンガー Re 数 ($Re=w d/\nu$) を求め, 補正係数 k_D と Re 数の関係を図-6 に示した. 補正係数 k_D と Re 数の間には, Re 数が 4 から 110 の範囲で $k_D=aRe^b$ (1mm の場合, $a=2.0 \times 10^{-4}$, $b=1.45$, 相関係数 $R=0.80$) の関係があることが分かった. 2mm はデータ数が少ないため当てはめを行っていない.

(3) 空隙内拘束(率)係数 κ と λ

(8)式から得られた κ と λ の値を表-3 に示す. λ が

表-2 多孔媒体モデルの特性

粒径 d	1mm	2mm	3mm	備考
D_{10} (mm)	1.03	1.92	2.55	
D_{60} (mm)	1.23	2.00	2.93	
U_c	1.20	1.04	1.15	
空隙率	0.315	0.385	0.425	
透水係数 (m/s)	2.52e-2	8.10e-2	11.4e-2	
固有浸透係数 (m ²)	2.57e-9	8.27e-9	1.16e-8	
	3.70e-10	3.35e-9	1.16e-8	*)
TCE 浸透係数 (m/s)	6.50e-2	2.09 e-1	2.93 e-1	**)
	9.35 e-3	8.47 e-2	2.93 e-1	*) **)

*) Kozeny-Carman 式 ($K = \frac{d^3}{180(1-e)^2}$) による.

**) TCE の密度 $\rho_n: 1.47 \times 10^6$ (g/m³), 粘性係数 $\mu: 5.7 \times 10^{-4}$ (Pa·s)

表-3 フィンガリング実験結果

実験ケース	C1a	C1b	C2	C3
粒径 d	1mm	1mm (100mm)	2mm	3mm
フィンガリング速度 w 10 ⁻² (m/s)	0.205	0.310	0.732	1.03
落下時間 T_0 (sec)	70.4	32.9	19.8	14.0
限界貯留深さ h_0 10 ⁻² (m)	1.0	1.0	0.92	0.83
流量 10 ⁻⁶ (m ³)				
Q_{in}/ρ_n	6.12	6.04	5.33	4.81
Q_{out}/ρ_n	2.66	3.08	2.20	1.94
Q_{out}/Q_{in}	0.428	0.486	0.405	0.458
補正係数 k_D	2.13e-3	4.42e-3	2.06e-3	2.02e-3
有効空隙率 n_{eD}	0.073	0.102	0.064	0.057
κ (sec ⁻¹)	0.0123	0.0222	0.0516	0.0728
λ 10 ⁻² (m ⁻¹)	0.0593	0.0720	0.0658	0.0710

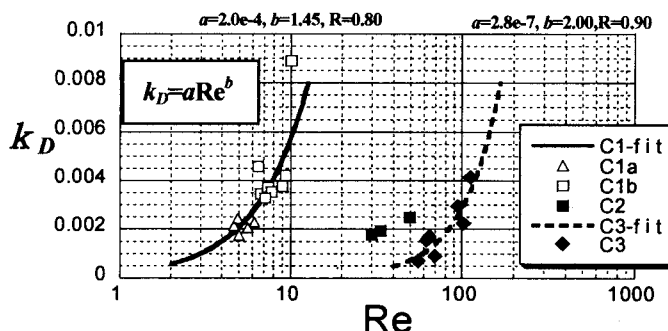


図-6 補正係数 k_D とフィンガー Re 数

大きいほど残存率が高いことを示す. λ の値でみると, 供試体長さが 100mm のケース(C1b)を除き, 粒

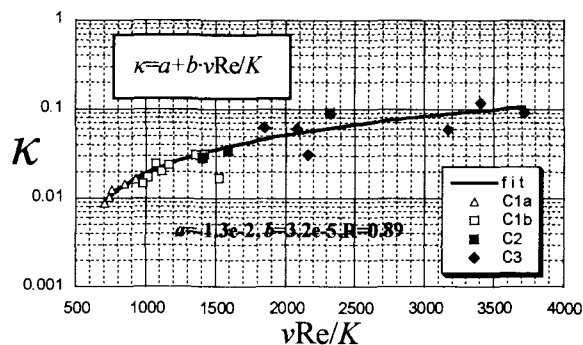


図-7 空隙内拘束率係数 κ とフィンガーRe数/固有浸透係数

径の増加により値が大きくなる。

κ の特性を見るために、 vRe/K との関係を図-7 のグラフに示す。 $\kappa=a+b \cdot vRe/K$ の当てはめの結果、 Re 数が4から110の範囲で、 $a=1.3 \times 10^{-2}$ 、 $b=3.2 \times 10^{-5}$ 、相関係数 $R=0.89$ という結果を得て、(9b)式が確かめられた。 κ の今後の検討への手掛りとなる。媒体粒子への付着を表す係数 η は、DNAPL フィンガリングにおいては、界面張力や残存飽和度、ぬれ特性などが関係すると考えられる。 η の詳細な検討にはDNAPL の物理的な特性から別のアプローチも必要であろう。

(4) 残存量を考慮した移流分散方程式にもとづく数値実験

実験で得られたパラメータ値をもとに、鉛直1次元について差分法による数値実験を行い、(1)-(3)式の解の性質を調べ、実験の結果と比較した。計算では、(4)式的前提から分散係数を0とした。解析条件を表-4に示す。計算には高精度で安定な TVD 型3次上流差分を使用して以下の結果を得ている(Cox and Nishikawa, 1991¹⁸⁾；保原，大宮司，1992¹⁹⁾。

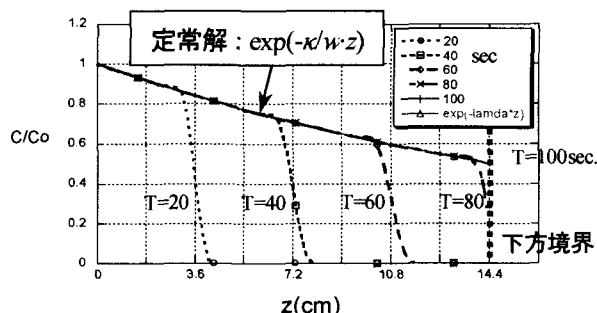
まず、フィンガー進行に伴う濃度分布の非定常解について $T=20$ から 100 秒を図-8(a)に示す。合わせて仮想的な定常解も示した。各時刻とも部分的に定常解と重なりながら進行していくことが分かる。フィンガーの先端が流出境界を通過した時点で、定常解にほぼ一致する。これにより非定常な残存量の把握に、(4)、(5)式にもとづく定式化(6)が可能であることが示された。非定常解に対応する時刻の実験画像、図5(a)-(d)では、実際のフィンガーの進行は一様ではないため、時刻と距離の対応にはずれが見られる。

次に、図-8(b)に残存量の空間分布のグラフを時系列で表示した。(1)、(3)式の消滅項 κC により方程式外に抜き去られた量を表し、各点におけるその時刻の残存割合を示す。各時刻までの投入総量(時間 $\times C_0$)との積が実際の残存量となる。残存量の計算値を求め、実験の結果と比較して式の妥当性を確認した。

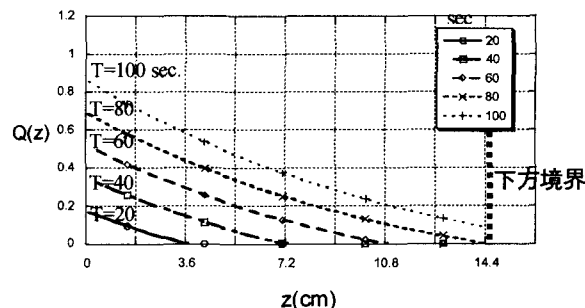
数値実験結果から、支配方程式の解の性質として、i)フィンガーが下部に到達した時点で近似的に定常

表-4 解析条件

入力条件					計算条件	
Run	$d(\text{cm})$	ε	$L(\text{cm})$	$T_0(\text{sec})$	$\Delta x(\text{cm})$	$\Delta t(\text{sec})$
28	0.1	0.315	14.4	80.0	0.2	0.01
$w(\text{cm/s})$	κ	Q_{in}/ρ_n	Q_{out}/ρ_n	$\Delta Q/\rho_n$	格子	反復
0.181	8.66×10^{-3}	7	3.5	3.5	72	10000



(a) フィンガー進行に伴う非定常濃度分布



(b) 残存量分布

図-8 数値実験結果

解となる、ii)厳密な非定常解は、定常解とステップ関数(ピストンフロー)の積(共通部分)の形となることが予想され、フィンガリング速度 w で移動するフィンガーのフロントに合わせて解の前縁が移動する、iii)差分解は、わずかな数値粘性誤差のために前縁が直立せず勾配を持つことが分かった。

したがって、(1)-(3)式は $t \leq T_0$ (落下時間) におけるフィンガリング現象を再現でき、残存量が濃度に比例する関係から定まる濃度と残存量の分布は、(5)、(6)式をもとに近似できるといえる。

5. まとめ

DNAPL 移行解析モデルの基礎付けのために、フィンガリング実験により DNAPL 残存量を把握し、残存量を考慮した移流分散方程式をもとに結果を検討して、次のような結論を得た。

- 1) DNAPL の mobile/immobile 性に注目して、フィンガリングを伴う移流分散方程式を構築した。
- 2) 実験から、ダルシー流速の補正係数 k_D (DNAPL と水との密度差、表面張力、フィンガリング形状係数の影響などを含む) が、フィンガー Re 数 ($Re=wd/v$, w : フィンガリング速度, d : 粒径, v : DNAPL 動粘性係数) と関係付けられることが分かった。

- 3) 残存量を支配するパラメータ($\kappa[T^{-1}]$:空隙内拘束率係数, $\lambda=\kappa/w[L^{-1}]$:空隙内拘束係数と呼ぶ)の値が実験的に得られた。また, κ が vRe/K に比例することを新たに見出した。
- 4) 実験より得られたパラメータ κ, w をもとに, 支配方程式の数値実験を行い, フィンガーフロントの進行に伴う非定常濃度分布の数値解を求めた。その結果から, 仮想的な定常濃度分布を前提とした濃度と残存量の定式化が確認できた。また, 算定した残存量が実験と合致した。
- 5) 残存量算定式について, すでに著者らが報告した, ランダムウォークモデルにもとづく DNAPL 移行モデルへの適用性が裏付けられた。

以上のことから, 帯水層中に浸入した DNAPL の残存量に関わる有意義な結果が得られ, またパラメータ κ, λ, η の更なる研究の発展が期待できる。

謝辞:

本研究の一部は文部科学省科学研究費 基盤研究(C)(1) 14550539「大気・土壌連成数学モデルにもとづく土壌汚染物質の予測解析システムの研究(研究代表者:佐藤 邦明)」の補助を受けた。また, 本研究の実験およびデータ整理に際しては, 埼玉大学工学部建設工学科4年生の後藤義卓君の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Mercer, J.W. and Cohen, R.M. : A review of immiscible fluids in the subsurface : Properties, models, characterization and remediations, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol.6, pp. 107-163, 1990.
- 2) Miller, C. T., Christakos, G., Imhoff, P. T., McBride, J. F., Pedit, J. A., Trangenstein, J. A. : Multiphase flow and transport modeling in heterogeneous porous media : Challenges and approaches, *Advances in Water Resources*, Vol.21, No.2, pp. 77-120, 1998.
- 3) 佐々木孝, 佐藤邦明: 大気・土壌・地下水連成モデルによる土壌中および地下水中 DNAPL の移行解析, 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会第9回講演集, pp.192-195, 2003.
- 4) 佐々木孝, 佐藤邦明: 帯水層における空隙内拘束を考慮した DNAPL 移流分散解析手法の現地適用性の検討, 日本地下水学会, 2003 年秋季講演会予稿集, pp.162-167, 2003.
- 5) Khachikian, C. and Harmon, T.C. : Nonaqueous phase liquid dissolution in porous media: Current state of knowledge and research needs, *Transport in Porous Media*, Vol.38, pp. 3-28, 2000.
- 6) Conrad, S.H., Wilson, J.L., Mason, W.R. and Peplinski, W.J. : Visualization of residual organic liquid trapped in aquifers, *Water Resources Research*, Vol.28, No.2, pp.467-478, 1992.
- 7) Geller, J.T. and Hunt, J.R. : Mass transfer from nonaqueous phase organic liquids in water-saturated porous media, *Water Resources Research*, Vol.29, No.4, pp. 833-845, 1993.
- 8) Powers, S.E., Abriola, L.M. and Weber, W.J. : An experimental investigation of nonaqueous phase liquid dissolution in saturated subsurface systems : Transient mass transfer rates, *Water Resources Research*, Vol.30, No.2, pp.321-332, 1994.
- 9) 伊藤圭二郎, 川端淳一: 帯水層中の DNAPL 残存量の評価について, 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会第9回講演集, pp.366-369, 2003.
- 10) Imhoff, P.T., Thyrum, G.P. and Miller, C.T. : Dissolution fingering during the solubilization of nonaqueous phase liquids in saturated porous media 2. Experimental observations, *Water Resources Research*, Vol.32, No.7, pp. 1929-1942, 1996.
- 11) Trantham, H. and Durnford, D. : Stochastic aggregation model (SAM) for DNAPL-water displacement in porous media, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol.36, pp.377-400, 1999.
- 12) Zhang, Z. F. and Smith, J.E. : The velocity of DNAPL fingering in water-saturated porous media : Laboratory experiments and mobile-immobile-zone model, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol.49, pp. 335-353, 2001.
- 13) 上野孝之, Giri, R.R., 西田憲司, 佐藤邦明: 飽和多孔媒体における DNAPL 浸透メカニズムに関する実験的研究, 水工学論文集, 第47巻, pp.313-318, 2003.
- 14) Yao, K.M., Habibian, M.T. and O'Melia, C.R. : Water and waste water filtration : Concepts and applications, *Environmental Science and Technology*, Vol.5, No.11, pp.1105-1112, 1971.
- 15) Rogers, B. and Logan, B.E. : Bacterial transport in NAPL-contaminated porous media, *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, Vol.126, No.7, pp.657-666, 2000.
- 16) Tufenkji, N., Redman, J.A. and Elimelech, M.: Interpreting deposition patterns of microbial particles in laboratory-scale column experiments, *Environmental Science and Technology*, Vol.37, No.3, pp.616-623, 2003.
- 17) 佐藤邦明, 岩佐義朗編著: 地下水理学, 丸善, 2002.
- 18) Cox, R.A. and Nishikawa, T. : A New Total Variation Diminishing Scheme for the Solution of Advective-Dominant Solute Transport, *Water Resources Research*, Vol.27, No.10, pp.2645-2654, 1991.
- 19) 保原充, 大宮司久明編: 数値流体力学—基礎と応用, 東京大学出版会, 1992.

(2003. 9. 30 受付)