

不飽和・飽和多孔体鉛直一次元浸透中の残余 NAPL を表現する数値モデルの開発

石井一英¹・古市 徹²

¹正会員 工修 北海道大学助手 工学研究科環境資源工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 西 8)
E-mail:k-ishii@eng.hokudai.ac.jp

²正会員 工博 北海道大学教授 工学研究科環境資源工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 西 8)

本研究は、不飽和・飽和多孔体中での残余NAPL量と揮発量を考慮に入れたNAPL原液の鉛直一次元浸透挙動数値モデルを提案し、その適用性を検討した。数値モデルの比較検証のための実験値として、トリクロロエチレン (TCE) の移動速度、水とTCEの鉛直分布、総揮発量を用いた。その結果、水とTCEの鉛直分布や揮発量を表現するためには、間隙中に残存する残余TCE量を考慮する必要があり、その不飽和帯での残余TCE量は、水飽和度が大きくなると増加する傾向にあった。そして、TCE先端部の移動速度についても、残余TCE量を考慮することにより、実験値と計算値が良く一致することを確かめた。さらに、注入強度が小さい場合、水がより多く排出されるため、TCE分布が下方に移動する現象も表現できることが分かった。

Key Words : *non-aqueous phase liquid, TCE, one-dimensional infiltration model, residual NAPL saturation, volatilization and mass balance*

1. 序論

トリクロロエチレン(TCE)等の有機塩素化合物やベンゼン等の芳香族化合物による土壌・地下水汚染が社会的な問題となっている。このような汚染は、TCE やベンゼン等を含む廃液が、原液状態で地中に浸透することによって生じる。このような原液は、水に溶けづらいため難水溶性液体 (Non-aqueous Phase Liquids, 以下 NAPL と呼ぶ) と言われている。地中に浸透した NAPL は、土壌間隙中で、水や空気相と独立した NAPL 相を形成し、下方へと浸透していく (間隙中には、水、NAPL、空気の 3 つの流体が独立して存在することになる。つまり 3 相が存在している。また、このような状態を 3 相系と表現する)。このとき、水よりも比重の小さい LNAPL (Light NAPL) は、地下水面上に停滞し、地下水流動方向に流れる。一方、水よりも比重の大きい DNAPL (Dense NAPL) は、地下水面を貫き、さらに下方の難透水性の地盤にまで到達することもある^{1,2,3}。NAPL が土壌層内を浸透する間、毛管力により、一部の NAPL は間隙中に取り残される。この取り残された NAPL は、残余 NAPL (residual NAPL) と呼ばれている。また、NAPL は、揮発や溶解現象によって、気相や水相に移行し、大気中に拡散したり、地下水と共に輸送される。特に、水への溶解速度は極めて遅いことから、NAPL は土壌・地下水汚染の長期の汚染源となっている⁴。

このような NAPL による土壌・地下水汚染を効率的に修復するためには、的確に汚染状況の把握を行った上で、適切なタイミングで、適切な修復技術を選択することが重要である。そのためには、長期の汚染源である NAPL 原液の存在場所や量を特定することが重要である。一般に、土壌・地下水汚染調査は、土壌ガス調査やボーリング調査を通じて行われるが、NAPL が原液状態で存在する汚染源を必ずしも特定できるわけではない。そのような背景から、最近では、PITT (Partition Interwell Tracer Tests) が注目されている⁵。PITT は、ある領域内における平均的な NAPL 存在量を推定する手法である。一方、NAPL の存在場所や量を数値モデルによって推測する方法もあるが、現場の地質構造の不均質性やフィンガリング現象等により、数値モデルによる正確な推測は困難であると言われている。しかしながら、数値モデルにより、浸透地点からの平均的な浸透深さや水平・鉛直分布を推定することは可能であると考えられる。このような調査結果や解析結果を有効に用いて、総合的に汚染状況を推測し、対策を検討することが重要であり、このためにも数値モデルの開発が必要である。

土壌層内における NAPL の浸透挙動に関する研究は、古くから行われており、次節で説明するように、いくつかの数値モデルが提案されている。しかし、それらのモデルの計算値と実験値との比較を通じたモデルの適用性に関する研究は限られている。例えば、水よりも比重の大

きいDNAPLは、地下水面を貫き深部にまで浸透すると考えられているが、実際は、浸透したDNAPLの一部は、注入量や強度によっては、地下水面上に取り残されたり、飽和帯の途中で停滞することも確認されている^{8),9)}。すなわち、不飽和・飽和多孔体中での浸透速度や鉛直分布に関する数値モデルの評価が必要である。また、NAPLの揮発や溶解を考慮した数値モデルの適用性も検証すべきである。

そこで本研究では、残余NAPL量と揮発量を考慮した不飽和・飽和多孔体中におけるNAPLの鉛直一次元浸透数値モデルを提案し、その適用性に関して検討する。特に、間隙中NAPLの基礎的挙動を解明するために、ガラスビーズ中のTCE原液の不飽和・飽和領域での浸透速度、鉛直分布、総揮発量の測定値⁷⁾との比較を通じて、ガラスビーズ特性、注入強度と時間が異なる場合のモデルの適用性を検討する。

2. NAPL浸透モデルの既往の研究と問題点

土壌層内のNAPLの浸透挙動を表現するモデルは数多く提案されている。それらのモデルは、1)キャピラリーモデル(capillary model)と2)成分モデル(compositional model)に分類される。キャピラリーモデルは、水相-NAPL相および気相-NAPL相の各相間での物質移動が無視される。つまり、揮発・溶解現象を考慮しないモデルである。一方、成分モデルは、各相間での物質移動が考慮される。本質的には、一種類のNAPLのみを扱う場合には、キャピラリーモデルに溶解項と揮発項が付け加わると、成分モデルと同等になる。

初期のNAPLのモデリングは、毛管力を無視したピストンフローを仮定していた。Brutsaert⁹⁾は、毛管力を考

慮した有限差分法を用いた多相流れモデルを検討し、Guwasa¹⁰⁾が鉛直一次元有限差分の2相流れのシミュレータを開発した。現在、提案されているキャピラリーモデルの原型は、Faust¹¹⁾によって構築された。それは2次元不飽和・飽和の3相系(水、NAPL、空気)流れのモデルである。続いて、Abriola & Pinderは、揮発項と溶解項を取り入れ、成分モデルを構築した^{12),13)}。しかし、その当時は、モデルの有用性は示唆されたものの、実験値やその他のパラメータに関するデータの蓄積がなかったため、モデルを検証することができなかった。

モデルの計算値と実験値との比較に関するこれまでの研究について、表-1に整理した。これらは、いずれもキャピラリーモデルを対象としたものである。表-1から分かるように、LNAPLに関しては、多くの研究が行われている。モデルの検証に用いられた項目は、飽和度や圧力の経時変化及び浸透するNAPLプリュームの先端速度や形状であった。

一方、DNAPLの挙動に対するモデルの検証に関する研究は、非常に限られている。また、いずれの場合も水-NAPLの2相系モデルの検証であった。これは、DNAPLは水よりも比重が大きいため、地下水面を貫き飽和帯にまで浸透するケースが多いと考えられるからである。先に述べたように、DNAPLの地下水面上の停滞を表現できるような不飽和・飽和帯の両領域におけるモデルの検証が必要である。

一方、揮発や溶解現象を考慮した成分モデルに関しては、揮発現象や溶解現象を単独で扱った研究は数多く存在する^{20)~26)}が、NAPLの浸透挙動と同時に揮発や溶解現象を検証した研究はない。すなわち、NAPL全体の物質収支を考慮して、数値モデルの検証を行う必要があると考えられる。

表-1 キャピラリーモデルと実験値の比較に関する既存の研究

分類	次元	NAPL	媒体	系	評価項目	著者
LNAPL	1次元	Soltrol C	ガラスビーズ	water - NAPL - air	平衡時点での鉛直分布	Eckberg and Sunada (1984) ¹⁴⁾
		Soltrol 170	砂質土	water - NAPL - air	飽和度と圧力の時間変化	Lenhard et al. (1988) ¹⁵⁾
		mineral oil and Soltrol 220	砂、ローム砂、シルトローム	water - NAPL - air	先端部の移動速度	Cary et al. (1989) ¹⁶⁾
		22H oil, kerosene and hexane	砂	water - NAPL	水の排出量とNAPL飽和度の時間変化	Thomson et al. (1992) ¹⁷⁾
		Soltrol 220	砂	water - NAPL - air	飽和度の時間変化	Oostrom and Lenhard (1998) ¹⁸⁾
	2次元	3種類のoil	砂質土	water - NAPL - air	飽和度の時間変化	Host-Madsen and Høgh Jensen (1992) ¹⁹⁾
		Soltrol 220	シリカ砂	water - NAPL - air	先端部の移動速度	Schroth et al. (1998) ²⁰⁾
		deisel oil	砂	water - NAPL - air	NAPL原液の分布形状	Thiez and Ducreux (1994) ²¹⁾
		n-heptane	シリカ砂	water - NAPL - air	飽和度と圧力の時間変化	Van Geel and Sykes (1997) ²²⁾
	実現場	diesel 1-D	シルト混じり砂	water - NAPL - air	炭化水素の飽和度	Huntley et al. (1994) ²³⁾
oil		砂混じり礫、礫混じり砂、砂	water - NAPL - air	油の飽和度	Essaid et al. (1993) ²⁴⁾	
DNAPL	1次元	TCE	砂質土	water - NAPL	水の排出量の時間変化	Parker et al. (1986) ²⁵⁾
	2次元	PCE*	シリカ砂	water - NAPL	NAPL原液の分布形状	Kueper and Frind (1991) ^{26,27)}
		TCE	砂	water - NAPL	NAPL飽和度の時間変化	Oostrom et al. (1999) ²⁸⁾

* テトラクロロエチレン

3. NAPL鉛直一次元浸透数値モデルの構築

(1) 基本方程式

a) 物質収支式

本研究で提案する数値モデルでは、従来のキャピラリーモデルに対して、新たに地下水面上にも停滞するDNAPL量を表現するために残余NAPL量を考慮すると共に、相間移動を表現するために揮発項も考慮し構築した。以下に、基本方程式を示す。

水-NAPL-空気の3相系では、各相の運動方程式は、式(1)のようなダルシーの法則に基づいて定式化されるのが一般的である^{37,38)}。さらに、各相での鉛直一次元の物質収支式を式(2)~(4)に示す。

$$q_i = -\frac{k_s k_{ri}}{\mu_i} \rho_w g \left(\frac{\partial h_i}{\partial x} - \frac{\rho_i}{\rho_w} \right) \quad (1)$$

$$\varepsilon \frac{\partial S_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{k_s k_{rw}}{\mu_w} \rho_w g \left(\frac{\partial h_w}{\partial x} - 1 \right) \right] + Q_w \quad (2)$$

$$\varepsilon \frac{\partial S_n}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{k_s k_{rn}}{\mu_n} \rho_w g \left(\frac{\partial h_n}{\partial x} - \frac{\rho_n}{\rho_w} \right) \right] + \frac{1}{\rho_n} k_{vol} (C_n^a - C_{ns}^a) + Q_n \quad (3)$$

$$\varepsilon \frac{\partial S_a}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{k_s k_{ra}}{\mu_a} \rho_w g \left(\frac{\partial h_a}{\partial x} - \frac{\rho_a}{\rho_w} \right) \right] + Q_a \quad (4)$$

ここで、 q_i : i 相のダルシー流速(フラックス) ($i=w, n, a, w$: 水相, n : NAPL相, a : 気相), S_i : i 相の飽和度[-] (= i 相の体積/間隙体積), ε : 間隙率[-], t : 時間[s], k_s : 固有浸透係数[m²], k_{ri} : i 相の相対浸透係数[-], μ_i : i 相の粘性係数[kg/m/s], ρ_i : i 相の密度[kg/m³], h_i : i 相の圧力水頭(水頭換算) [m], x : 座標(下向きを正), k_{vol} : NAPL相から気相への物質移動係数[1/s], C_n^a : 気相中のNAPL濃度[kg/m³], C_{ns}^a : 気相中のNAPL飽和濃度[kg/m³], Q_i : i 相の湧き出し項である。また、気相の圧力は大気圧で一定であり、 $S_w + S_n + S_a = 1$ が成立するので、気相に関する式(4)は解かない。また、気相中におけるNAPLの物質収支式は、次のようになる。拡散のみで輸送されると仮定した。

$$\varepsilon S_a \frac{\partial C_n^a}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon S_a D_a \frac{\partial C_n^a}{\partial x} \right) - k_{vol} (C_n^a - C_{ns}^a) \quad (5)$$

ここで、 ξ : 屈曲率[-], D_a : 空気中におけるNAPLの拡散

係数[m²/s]である。

b) 飽和度-毛管圧の関係(特性曲線)

多孔体に対する流体の濡れ性の順序が、水、NAPL、空気の時、次の仮定が成り立つ³⁹⁾。①水-NAPL-空気の3相が存在する時の水飽和度は、水-NAPL間に働く毛管圧のみの関数であり、その関数は水-NAPLの2相間における水飽和度と毛管圧の関数関係に等しい。②同様に3相が存在するときの全液体飽和度は、NAPL-空気間に働く毛管圧の関数であり、その関数はNAPL-水の2相間におけるNAPLの飽和度と毛管圧の関数関係に等しい。これらの仮定を定式化すると、以下のようになる。

$$h_{nw} = h_n - h_w \quad (6)$$

$$h_{an} = h_a - h_n \quad (7)$$

$$S_t = S_w + S_n \quad (8)$$

$$S_w(h_{nw}) = S_w^{n-w}(h_{nw}) \quad (9)$$

$$S_t(h_{an}) = S_n^{a-n}(h_{an}) \quad (10)$$

ここで、 h_{ij} : i 相と j 相間の毛管圧の水頭換算値[m], S_i : 全液体飽和度, 上付文字の $n-w$ と $a-n$ は、それぞれNAPL-水、空気-NAPLの2相間の関係であることを表す。

また、水-空気の2相系での特性曲線が既知である場合には、スケーリングによりNAPL-空気及び水-NAPL系の特性曲線(式(9), 式(10)の右辺部分)が推測される。今、水-空気の2相系での特性曲線が、van Genuchten式⁴⁰⁾で与えられる場合には、以下のように定式化される。

水-空気系の特性曲線

$$S_{we} = \frac{S_w - S_{rw}}{1 - S_{rw}} = \left\{ 1 + (\alpha h_w)^n \right\}^{-m} \quad (11)$$

NAPL-空気系の特性曲線

$$S_{ne} = \frac{S_n - S_m}{1 - S_m} = \left\{ 1 + \left(\alpha \frac{\sigma_{an}}{\sigma_{aw}} h_w \right)^n \right\}^{-m} \quad (12)$$

水-NAPL 系の特性曲線

$$S_{we} = \frac{S_w - S_{rw}}{1 - S_{rw}} = \left\{ 1 + \left(\alpha \frac{\sigma_{nw}}{\sigma_{aw}} h_w \right)^n \right\}^{-m} \quad (13)$$

ここで、 S_{ie} : i 相の有効飽和度、 S_n : n 相の残余飽和度、 σ_j : i 相と j 相間の界面張力[N/m]、 α_n : van Genuchten式のパラメータ、 $m=1-1/n$ である。式(11)から式(12)へのスケールリング理論の適用性に関しては、石井ら³⁾によってTCE, TCA, トルエンで成り立つことが確かめられている。また、Lenhardらも、式(11)から、式(12)、式(13)へのスケールリング理論が成り立つことをSoltrोलを用いて確認している⁴⁾。つまり、水-空気系の特性曲線が求まると、界面張力により、式(11)、式(12)より、それぞれ2相系での特性曲線が推定でき、さらに式(9)、式(10)より3相系での特性曲線の推定が可能となる。

c) 相対浸透係数

3 相系での各相における相対浸透係数に関しては、Parker ら⁴²⁾の定式化を利用する。

$$k_{rw} = S_{we}^{1/2} \left[1 - \left(S_{we}^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (14)$$

$$k_m = S_{ne}^{1/2} \left[\left(1 - S_{we}^{1/m} \right)^m - \left(1 - S_{ie}^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (15)$$

ただし、

$$S_{ie} = S_{we} + S_{ne} \quad (16)$$

d) 主変数の選択

上記式(2)と式(3)を数値的に解くために、主変数を選択する必要がある。Kueper and Frind は、水-NAPL(テトラクロロエチレン)の2相系の場合、計算領域内でのNAPLの有無に関係なく、水が必ず存在することに着目して、 S_w と h_w を主変数として計算を行っている^{26), 27)}。一方、本研究で扱う3相系の場合は、NAPLが存在しない領域は、水-空気の2相系になるので、NAPLの有無に応じて、主変数を変更する必要がある。本研究では、NAPLが存在しない領域では主変数として h_w 、NAPLが存在する領域については h_{nw} と h_{nw} を選択した。これは、水-空気の2相系での不飽和・飽和浸透流解析の際には、圧力水頭 h_w を変数として解いた方が、不飽和と飽和領域の場合分けを考慮せずに統一的に解くことができる⁴³⁾ということ、水-NAPL-空気の3相系に拡張したと解釈することができる。以上より、式(2)と式(3)は以下の

ように変形される。

<NAPLが存在する場合>

$$\varepsilon \frac{\partial S_w}{\partial h_{nw}} \frac{\partial h_{nw}}{\partial t} = \quad (17)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{k_s k_{rw}}{\mu_w} \rho_w g \left(\frac{\partial (h_{an} - h_{nw})}{\partial x} - 1 \right) \right\} + Q_w$$

$$\varepsilon \left(\frac{\partial S_i}{\partial h_{an}} \frac{\partial h_{an}}{\partial t} - \frac{\partial S_w}{\partial h_{nw}} \frac{\partial h_{nw}}{\partial t} \right) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{k_s k_m}{\mu_n} \rho_w g \left(\frac{\partial h_{an}}{\partial x} - \frac{\rho_n}{\rho_w} \right) \right\} \quad (18)$$

$$+ \frac{1}{\rho_n} k_{vol} (C_n^a - C_{ns}^a) + Q_n$$

<NAPLが存在しない場合>

$$\varepsilon \frac{\partial S_w}{\partial h_w} \frac{\partial h_w}{\partial t} = \quad (19)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{k_s k_{rw}}{\mu_w} \rho_w g \left(\frac{\partial h_w}{\partial x} - 1 \right) \right\} + Q_w$$

結局、式(17)、式(18)、式(19)及び式(5)を h_{nw} 、 h_{an} 、 h_w 、 C_n^a について、解くことになる。

(2) 数値モデル

まず、空間離散については、計算領域に関して差分法を用いて近似を行った。本研究では、前節で述べたように、NAPLの有無によって解くべき方程式が異なること、そして残余NAPL飽和度によって各点からのNAPLフラックス量が異なることから、各接点からのNAPLと水のフラックス量を求めた後に、各接点で物質収支式を解くことにした。そのため、時間離散化に関しても、多くの研究が陰解法を用いているのに対して、本研究では陽解法を用いることにした。

本研究で陽解法を用いた理由について、補足する。陽解法も陰解法も計算条件の設定が適切であれば、数値解はほぼ同じになる。先に示したように、本モデルではNAPLの有無により解く方程式が異なる。例えば、図-1(a)に示すように陽解法で解く場合には、 $i-1$ 番目のボックスで $S_i > 0$ の時は式(18)と式(19)を解く。また i 番目のボックスも $i-1$ 番目のボックスからのNAPLのフラックスが存在するので、NAPLが存在する場合と同様に式(18)と式(19)を解く。一方、陽解法では Δt の間に、クーラン数の条件を満たす場合には、 $\Delta x \times q_n^{i-1} < \Delta x$ であるから、 i

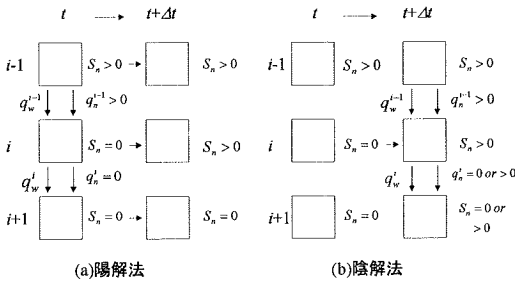


図-1 陽解法と陰解法

番目からの NAPL のフラックス(q_w^i)は必ずゼロになる。よって、 $i+1$ 番目のボックスでは、式(20)のみを解けば良いことになる。一方、図-1 (b)の陰解法では、 Δt 時間後の i 番目からの NAPL のフラックスは、 Δt と $i-1$ 番目のボックスからのフラックスの大きさによって決定される。つまり、 $i-1$ 番目のボックスで解くべき方程式が、一意に決定されないという問題が生じる。

また、カラムに注入する NAPL 強度に注目すると、例えば Oostrom and Lenhard¹⁸⁾は、固有浸透係数 4×10^{-11} m²の砂層カラム (断面積 45.34 cm²) に 2 mL/min の流量で 100 mL 注入した。つまり、NAPL 注入強度は 0.044 cm/min となる。一方、本研究における NAPL 注入強度は、0.39~17.34 cm/min であり、過去の事例と較べて大きな値である。つまり、非常に短時間に先端部が、水-空気 の 2 相系から水-NAPL-空気 の 3 相系に変化する状況を模擬しなくてはならない。一般に、陰解法は、静的あるいは低速な問題に、陽解法は動的あるいは高速な問題に適していると言われている⁴⁴⁾。衝撃解析の分野では、極めて短時間に過渡的な現象を扱う必要のあること、そして非線形性を考慮しつつ高い時間分解能で解析を行う必要があることから、陽解法の方がむしろ多く用いられている⁴⁴⁾。このような理由から、本研究では、比較対象である実験結果との比較を行うために陽解法を採用した。なお、 Δx は 2.5~5.0 cm であり、 Δt は $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-4}$ s で行った (Δx に対しては、1.0 cm にまで小さく設定して計算を行ったが、計算結果に大きな違いは見られなかったことから、計算時間を考慮して決定した)。

4. 残余 NAPL 飽和度に及ぼす影響因子の整理

LNAPL に対して、数値モデルと実験値との比較の際には、多孔体間隙中に取り残される (トラップされる) 残余 NAPL を考慮する必要があることを指摘している研究が多い⁴⁵⁾。また、既に述べた石井らの実験でも、DNAPL が地下水面上に取り残される現象が確認されている^{7,8)}。これまでの残余 NAPL に関する研究より、残余 NAPL

飽和度に及ぼす影響因子の整理を行う。

Conrad et al. は、間隙中に存在する残余 NAPL を視覚的に観察し、飽和帯における残余 NAPL は、個々に独立した滴であることを報告している⁴⁶⁾。また、Larson et al.⁴⁷⁾ や Chatzis et al.⁴⁸⁾ も、間隙中で NAPL が不連続状態になると、毛管力によって間隙中にトラップされると報告している。残余 NAPL 飽和度に関する定性的な関係として、Mercer and Cohen⁴⁹⁾ は、媒体の間隙分布、濡れ性、流体の粘性比と密度比、界面張力、重力と浮力、水力学の勾配によって支配されると述べている。これらに関して具体的に分かっていることは、以下である。① 間隙率が小さいと残余 NAPL 飽和度は大きくなる傾向にある⁴⁹⁾。② 水分を含んだ土壌の方が、残余 NAPL 飽和度は大きい傾向にある^{30,49)}。但し、完全に乾燥した土壌では、水分を含んだ土壌よりも残余 NAPL 飽和度は大きい⁵⁰⁾。③ 飽和帯では、粘土やシルトの含有量により残余 NAPL 飽和度は大きく異なる⁵¹⁾。④ 粘性と毛管力の比を表す無次元数である毛管定数が 10^4 以上の時、残余 NAPL は移動する⁴⁷⁾。⑤ 重力と毛管力の比を表す Bond 数と飽和領域における残余 NAPL 飽和度に相関関係がある^{52,53)}。これに関連して、土壌水分が極めて少ない懸水帯領域においても、Bond 数と残余 NAPL 飽和度の関係が示唆されている⁸⁾。

一方、NAPL のトラップがヒステリシスによって生じるとして、特性曲線の排水曲線と湿潤曲線を用いて、水と NAPL の飽和度の履歴により、残余 NAPL 飽和度を計算する手法も提案されている⁴⁵⁾。しかし、それぞれの媒体にういて、NAPL を用いた排水曲線と湿潤曲線両方の特性曲線を実験的に求めることは困難であると考えられる。

以上のように、残余 NAPL 飽和度を定量的に設定することは、既往の研究で得られた知見のみでは困難であることが伺われる。そこで、上記①~⑤までの定性的な関係のうち、媒体と NAPL の種類を固定して考えると、間隙中の水分量が残余 NAPL 飽和度の一つの影響因子であることが分かる。したがって、本研究では、間隙中の水飽和度と残余 NAPL 飽和度の関係を、本研究で比較対象とする実験データより推測し、先に示したモデルに組み込み解析することにした。

5. NAPL 鉛直一次元浸透モデルの適用性評価

(1) 実験方法の概要

本研究で検討を行う NAPL 鉛直一次元浸透モデルの検証を行うための実験データについての詳細は、石井らがまとめている⁷⁾。本論文では、概略のみ示すことにする。

実験は、図-2 に示すガラスカラム (内径 47mm, 長さ 500mm) を用いた TCE プリュームの先端部の移動速度を測定した実験と、ステンレスカラム (内径 35mm, 高さ 25 又は 50mm の輪切り状のカラムを高さ 650~700mm に積み重ねたもの。図-2 のガラスカラムの代わりに用いた) を用いた水と NAPL の鉛直方向の飽和度分布を測定した実験に分けられる。使用したガラスビーズは、表-2 に示すように beads 1(0.5-0.6mm)と beads 2 (0.18-0.212mm)の 2種類であり、充填時の特性を表-2 に示しておく。また、各ガラスビーズ層の水-空気の 2 相系の特性曲線を図-3 に示す。これらの値は、いずれも浸透実験とは別に測定されたものであり、透水係数は飽和透水試験により、特性曲線は土柱法によって求め、カーブフィッティングにより van Genuchten とパラメータと残余飽和度を求めた。さらに使用した NAPL は TCE であり、表-3 に水も含めた流体としての物性値を示しておく。

実験方法は、ガラスビーズをカラムに充填した後、カラム下方よりビーズ層を飽和状態にする。カラム内の水を重力排水させ、約 1 日経過した後、TCE をカラム上方から注入した。ガラスカラムでは、先端部の位置の時間

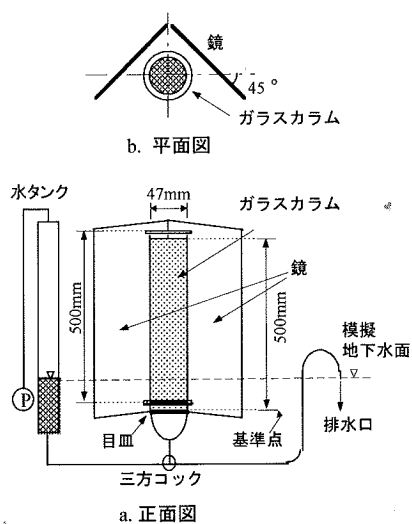


図-2 実験装置図

表-2 ガラスビーズ層の特性

	beads 1	beads 2
粒径 [mm]	0.5-0.6	0.18-0.212
透水係数 [cm/s]	0.081	0.025
固有浸透係数 [m ²]	8.26×10 ⁻¹¹	2.55×10 ⁻¹¹
van Genuchtenのパラメータ		
α [1/cm]	0.055	0.026
n [-]	9.49	13.88
間隙率 [-]	0.36	0.38
残余水飽和度 [-]	0.03	0.04

変化を整理した。一方、ステンレスカラムでは、実験終了後、ステンレスカラムを上方から輪切りに分解し、カラム内のガラスビーズ量、水と TCE 量を測定した。

なお、カラム上部より TCE を注入した際に、カラム内の気相の圧力の上昇を考慮する必要が考えられたが、排水口からの流出水量の測定結果から、気相の圧力上昇の NAPL 浸透挙動へ及ぼす影響は小さいものと考えられた。

また、揮発量を評価するために、TCE 浸透実験期間中断続的に、ステンレスカラムの上に図-4 のように蓋をし、蓋とカラム間の空間中の TCE ガス濃度の経時変化を測定することによりフラックス量として求め、そのフラックスの経時変化より TCE 総揮発量を求めた。

なお、TCE 注入前のカラム内の水分分布に注目して、本研究では、カラム内の領域をいくつかの領域に分けて考える。図-5 に示すように、地下水面よりも下方は飽和

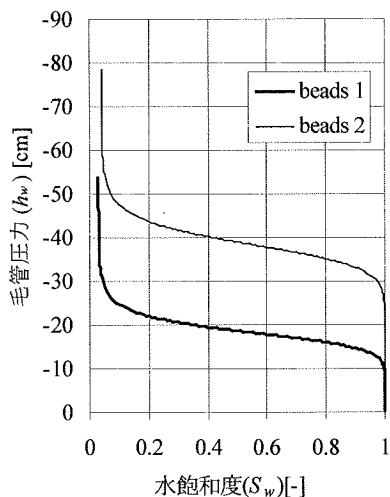


図-3 使用したガラスビーズの毛管圧力と水飽和度の関係 (特性曲線)

表-3 流体の物理特性

流体	密度 [g/cm ³]	粘性 [kg/m/s]	表面張力 [N/m]		蒸気圧 (20°C)[mmHg]
			対空気	対水	
TCE	1.4649	0.58×10 ⁻³	29.5×10 ⁻³	35.0×10 ⁻³	60.0
水	0.9987	1.005×10 ⁻³	72.8×10 ⁻³	—	17.5

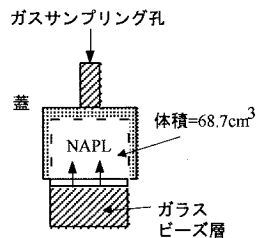


図-4 TCE 揮発量の測定のための装置

帯($S_w=1$, satと記す), 毛管上昇により水面が上昇して見えるので, その水面を見かけの水面(飽和毛管帯上縁)と定義し, 地下水面から見かけの水面までを毛管飽和帯($S_w=1$, sc)と呼び, その上方を不飽和帯(unsat)とした. さらに, 不飽和帯を水分が急激に減少する部分を毛管不飽和帯($S_w < S_w < 1$, uc), 水分量が少なく一定の領域を懸水帯($S_w = S_{nw}$)と定義した.

(2) 計算条件

a) 初期条件と境界条件

計算領域及び, 初期条件, 境界条件について図-6に示す. h は水頭であり, $h=0$ は模擬地下水面を表す. h_{at} 及び h_{nw} に関しては, NAPL が存在しない初期状態では定義されないが, 計算上, 定義する必要がある. $h < 0$ の領域では, ごくわずかな NAPL が存在すると仮定し, 式(11)と式(12)より h_{at} と h_{nw} を定義した. 一方, $h > 0$ の領域では, h_{nw} は $h < 0$ の領域と同じ考え方で定義したが, h_{at} に

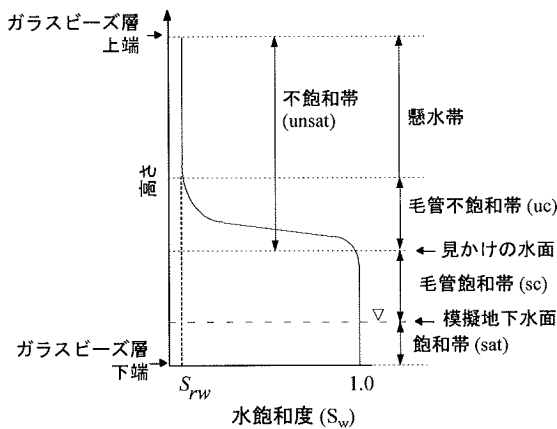


図-5 水飽和度に着目した領域の定義

ついては, 全液体の飽和度の関数となることから, h_w と初期条件は等しいとした. また, C_n^a については, $h > 0$ の

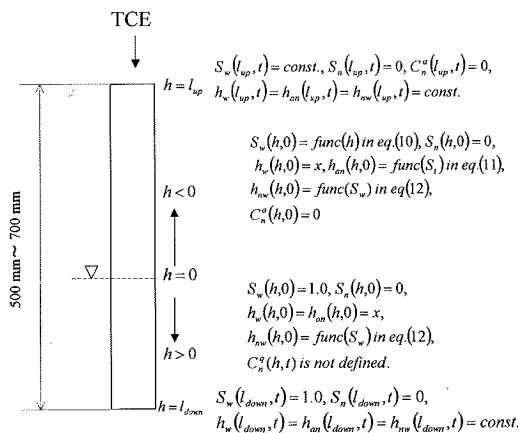


図-6 初期条件と境界条件

飽和帯では $S_w=0$ であるので, 定義されない. また, $h < 0$ の領域であっても $S_w=0$ となる場合には, 定義しなかった.

b) 計算パターン

本研究で検討する NAPL 鉛直次元浸透数値モデルの検証に用いた実験及び計算条件を表-4に示す. 鉛直分布の検証のために 5 パターン, 先端部の移動速度を検証するために 5 パターン行った.

鉛直分布の検証では, Run1 と 2 は beads 1, Run3~5 は beads 2 を用いて行った. さらに, Run1, 3, 4 は, 注入強度としては大きく, Run2 と 5 は, 注入強度は小さく, かつ注入時間を長く設定した. 一方, 先端部の移動速度の検証では, Run6~8 では beads 1, Run9 と 10 では beads 2 を用いて行った. そして, Run6, 7, 9 では注入強度を大きく設定し, Run8 と 10 では, 注入強度は小さく, かつ注入時間を長く設定した. また, 残余 NAPL 飽和度の考慮の必要性を考察するために, それぞれ残余 NAPL 飽和度を考慮した場合と考慮しない場合について計算を行った.

c) 残余 NAPL 飽和度の設定

5.1 節で説明した実験より得られた鉛直方向の TCE と水の鉛直分布の結果を用いて, 4 章で述べたように, 残余 NAPL 飽和度 S_m と水飽和度 S_w の関係を, 図-7にまとめた. 図-7に表せなかった部分について, S_w がプロットのある点よりも大きい領域では, S_w が 0.8 程度 (S_w がほぼ 1 であり, 毛管飽和帯であると推測される) になるまでは, プロット値が存在しなかった. すなわち, 用いたガラスビーズの粒径が均一だったため (図-3 で示した毛管不飽和帯の領域が狭かったため), 実験的に求めることができなかった領域であると言える. また, S_w がさらに大きくなり, 1 に近づくにつれ, S_m は低下する傾向にあり, 飽和帯領域($S_w=1$)での S_m は, beads 1 の場合は 0.05~0.1 であり, beads 2 では, ほぼ 0.1 であった.

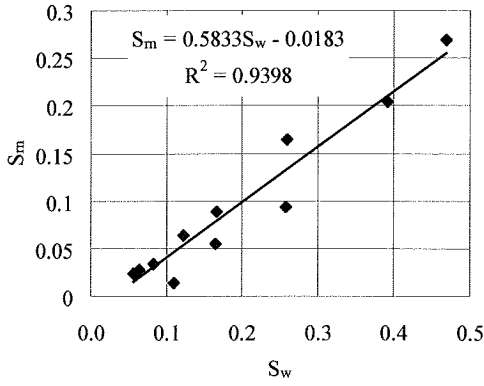
表-4(a) 実験条件及び計算条件—鉛直分布—

Run No.	1	2	3	4	5
ビーズ種類	beads 1	beads 1	beads 2	beads 2	beads 2
ガラスビーズ層の高さ [cm]	65	65	65	70	65
地下水面の高さ [cm]	20	15	15	15	15
注入TCE体積 [mL]	20	29.1	20	20	33.9
注入時間 [s]	8	1800	60	60	2097
平均注入フラックス [cm/min]	15.59	0.10	2.08	2.08	0.10
実験時間 [h]	68	85	99	94	94

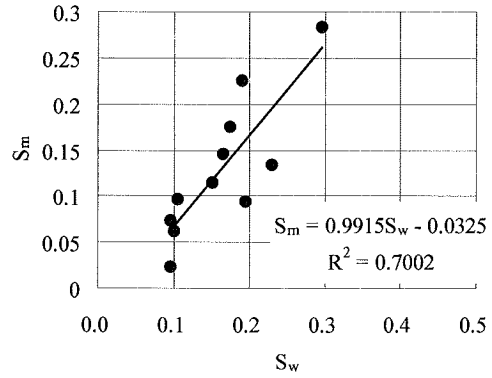
表-4(b) 実験条件及び計算条件

—TCE 先端部の移動速度—

Run No.	6	7	8	9	10
ビーズ種類	beads 1	beads 1	beads 1	beads 2	beads 2
地下水面の高さ [cm]	9	10	9.5	9.5	7.5
注入TCE体積 [mL]	20	20	38	20	47
注入時間 [s]	4	4	2303	180	2635.5
平均注入フラックス [cm/min]	17.34	17.34	0.057	0.39	0.062
実験時間 [h]	90	60.5	120	177	188



(a) beads 1



(b) beads 2

図-7 残余 NAPL 飽和度と水飽和度の関係

図-7 より、若干ばらつきはあるものの、 S_w が増加すると S_m も増加する傾向にある。また、粒径が小さい beads 2の方が、傾きが大きい傾向にあった。

そこで、本研究で残余 NAPL 飽和度を考慮に入れた計算をする際には、下記の計算式により求めることにした。

<beads 1 の場合>

$$S_m = 0.014 \quad (S_w < 0.068)$$

$$S_m = 0.583 \times S_w - 0.018 \quad (0.068 \leq S_w \leq 0.468)$$

$$S_m = 0.05(\text{Run1}), 0.1(\text{Run2}) \quad (S_w > 0.468) \quad (20)$$

<beads 2 の場合>

$$S_m = 0.023 \quad (S_w < 0.096)$$

$$S_m = 0.992 \times S_w - 0.033 \quad (0.096 \leq S_w \leq 0.296)$$

$$S_m = 0.1 \quad (S_w > 0.296) \quad (21)$$

d) 揮発に関するパラメータ

本研究における揮発項の計算には、平衡関係式ではなく、物質移動係数を用いた非平衡関係式を用いた。物質移動係数である k_{vol} に関する実験値に関しては、Wilkinsらが求めた式²⁰⁾を用いた。空気相中の TCE 成分の移動に関するパラメータを表-5に示す。

6. 実験結果と計算値の比較

(1) 鉛直方向の存在量分布と揮発量

Run1~5について、浸透実験により求めた水と TCE の鉛直分布の測定結果(obs.)と計算結果(calc.)の比較を図-8~図-12に示す。これらの図はいずれも、表-4(a)に示す実験期間終了後の分布を示している。また、各図には、a)残余 NAPL 飽和度を考慮した場合と b)残余 NAPL 飽和度を考慮しない場合の結果を示した。横軸は飽和度であり、縦軸にはガラスビーズ層の最下端をゼロとした高

表-5 気相中の TCE の拡散移動に関するパラメータ

	beads 1	beads 2
総括物質移動係数 k_{vol} [1/s]	9.07×10^{-3}	5.76×10^{-3}
気相中の飽和 TCE 濃度 C_{ns}^a [$\text{g}/\text{m}^3\text{-air}$]	431	431
屈曲度 ξ [-]	1.35	1.35
気相中の拡散係数 D^a [m^2/s]	6.70×10^{-6}	6.70×10^{-6}

さを示した。プロットは、水の飽和度と全液体飽和度を示している。すなわち、各高さにおいて、全液体飽和度と水飽和度の差が、TCE の飽和度ということになる。また、TCE の物質収支として、注入量(a)、実験終了後カラム内に存在していた TCE 量(b)、カラム下部から流出した TCE 量(c)、カラム内の間隙中の気相に存在する TCE 量(d)、カラム上端から揮発した TCE 量(e)とそれらの総和(g) ($g=b+c+d+e+f$) についても各図に示す。総和について、実験値及び計算値が注入量と必ずしも等しくはならず、これを収支誤差(h)と表現している。実験値については、実験上の測定誤差であり、特に Run3 と 4 では、カラムの継ぎ目から TCE が漏出してしまい(各図では、漏出 NAPL 量(f)として推定値を示している)、漏出量を考慮しても 8 割程度の回収率となってしまった。一方、計算値に関しては、数値誤差(%)を表わしており、本研究では 0.21~2.11%であった。これらの数値誤差に関しては、水と NAPL の 2 相系の場合で、陰解法と Newton-Raphson 法を用いた例では、0.059%²⁰⁾であり、これに較べて本研究の誤差は大きなものになった。これは、陽解法を用いたことと、不飽和・飽和領域の解析を行ったため、 $\partial S_j / \partial h_m$ の非線形性が影響したものと考えられる。特に、Run1 で大きくなったのは、 dt が 10^{-4} s であり、他の Run より 1 オーダー小さく、計算回数が 10 倍に多くなったことが原因であると思われる。

実験値と計算値との比較を行う。

①図-8~図-12の実験値から分かるように、DNAPL は必ずしも全量が地下水を貫いて下方に浸透する訳では

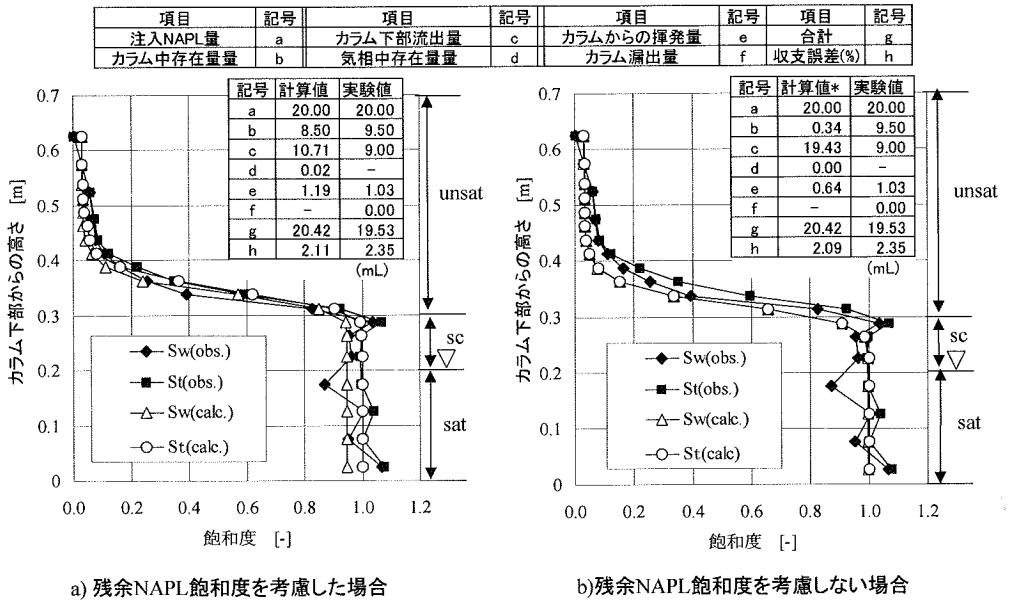


図-8 水と TCE の鉛直分布 (Run 1, beads1, 注入量/注入時間=20 mL/8 s)

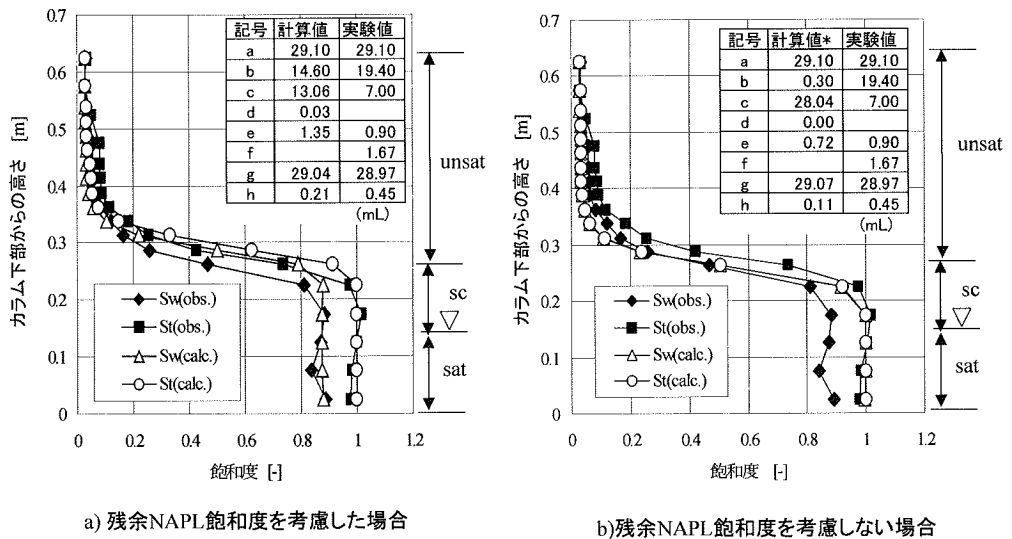
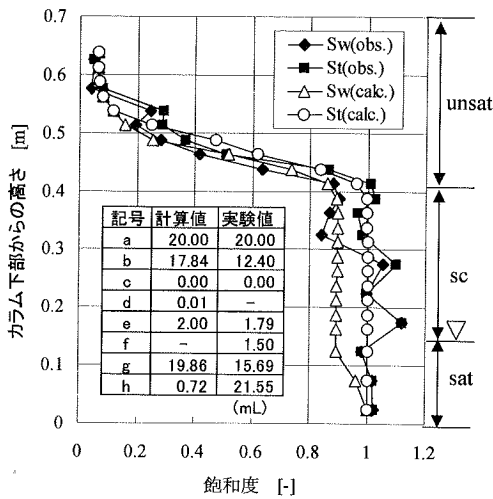


図-9 水と TCE の鉛直分布 (Run 2, beads 1, 注入量/注入時間=29.1 mL/1800 s)

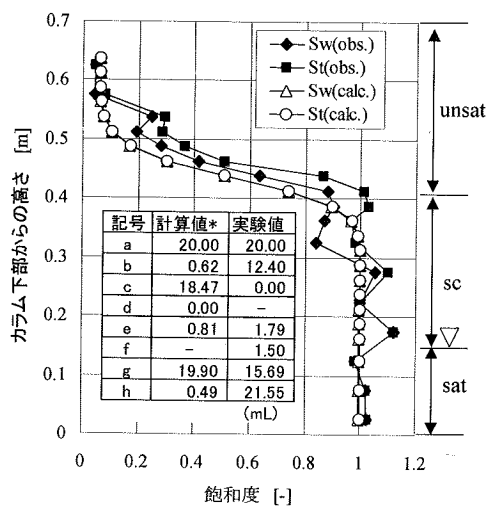
なく、不飽和毛管帯や毛管飽和帯にも存在することがわかる。しかし、残余 NAPL 飽和度を考慮しない場合 (図-8~図-12 の b)) では、TCE の飽和度は $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4$ のオーダーであり、水飽和度と全液体飽和度がほぼ同じになった。そのことは、物質収支からも明らかであり、残余 NAPL 飽和度を考慮しなかった場合には、ほとんどの TCE がカラム下部から流出してしまい、計算終了後カラム内に存在する TCE 量が極めて少ない値になっていた。一方、残余 NAPL 飽和度を考

慮した場合は、毛管不飽和帯や飽和毛管帯にも TCE が存在する様子が表現できている。

②beads 2 の Run3 (図-10 の a)) と 4 (図-11 の a)) は、ガラスビーズ層の高さ以外は同じ条件である。これらでは、計算値の方が下方にまで浸透しており、飽和帯における測定値と計算値の違いが生じていた。これは前述したように、この 2 つの実験では、TCE が水面に一時停滞して、飽和帯に浸透する最中で、カラム継ぎ目から TCE が漏出してしまい、実験上、TCE が下方

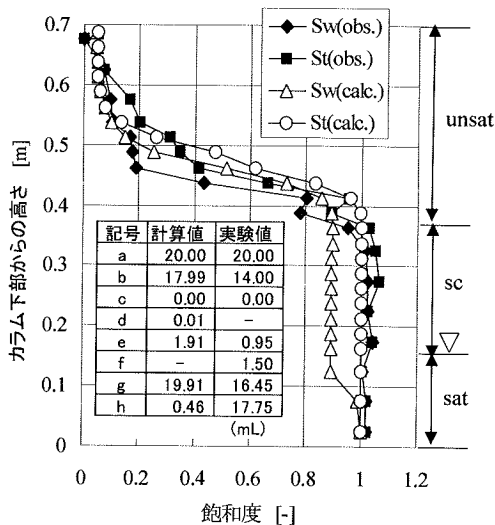


a) 残余NAPL飽和度を考慮した場合

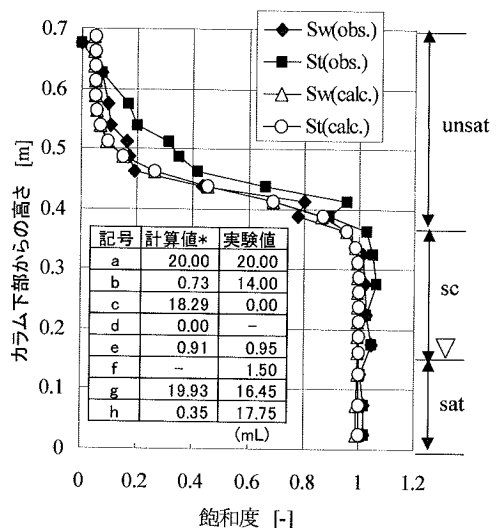


b) 残余NAPL飽和度を考慮しない場合

図-10 水と TCE の鉛直分布 (Run 3, beads 2, 注入量/注入時間=20 mL/60s, ガラスビーズ層高さ 65cm)



a) 残余NAPL飽和度を考慮した場合



b) 残余NAPL飽和度を考慮しない場合

図-11 水と TCE の鉛直分布 (Run 4, beads 2, 注入量/注入時間=20 mL/60s, ガラスビーズ層高さ 70cm)

にまでそれほど浸透しなかったものと考えられる。

③注入強度と時間の違いに着目し, Run1 (図-8の a)) と Run2 (図-9の a)) 及び Run3 (図-10の a)) と Run5 (図-12の a)) の比較を行う。それぞれの実験値では, 注入強度が小さく, 注入時間が長いほど, カラム中の水が多く排出されるため TCE が下方に分布する傾向が見られた。これに対して, Run2 (図-9の a)) と Run5 (図-12の a)) で示すように, 本モデルはその傾向も表現できることが分かった。よって, 本実験範囲内で, 注入条件を変更した場合の, 本数値モデルの追従性を

確かめることができた。

④また, 図-8~図-12に示した揮発量 (記号 e) に着目すると, 残余 NAPL 飽和度を考慮しなかった場合よりも考慮した場合の方が揮発量は多くなった。これは, 前述したように残余 NAPL 飽和度を考慮した場合の方が, 揮発量に影響を及ぼすと考えられる不飽和帯に存在する TCE 量が多いことが理由である。また, 残余 NAPL 飽和度を考慮した場合, Run1 と 3 の場合では, 測定値とも良く一致していると考えられる。Run4 と 5 は, 揮発量の測定時に若干ロスがあったものと推測される。

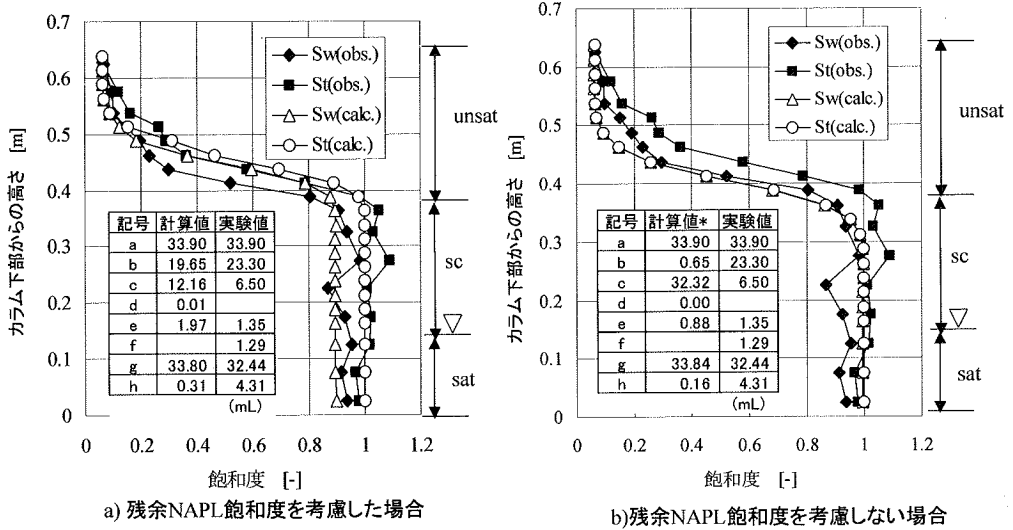


図-12 水と TCE の鉛直分布 (Run 5, beads 2, 注入量/注入時間=33.9 mL/2097 s)

以上より、本研究で用いた揮発項を考慮したキャピラリーモデルが、残余 NAPL 飽和度を考慮することによって、TCE と水の鉛直分布をより良く表現でき、さらに本計算範囲ではあるが、ガラスビーズの粒径や注入強度と時間の違いによる TCE と水の鉛直分布の違いも表現できることが分かった。そして、これまで検証が行われてこなかった実験期間中の揮発量も、一次近似ではあるが、表現できることが分かった。

(2) TCE 先端部の移動速度

次に、TCE プリュームの先端部の移動速度の比較を図-13~図-17 に示す。実験値は、TCE の浸透の様子を撮影したビデオ画像より、目視によりプロットした。この場合、必ずしもカラムの断面に対して均一に TCE が浸透しなかったため、正面(Obs.front)、左側面(Obs.left)、右側面(Obs.right)のそれぞれの方向から観察された先端部の軌跡をプロットした。横軸は時間を対数で示しており、縦軸はガラスビーズ層の最下端からの高さである。

一方、計算値では、TCE プリュームの先端部の定義を目視によって行うことができないので、計算格子上の TCE 飽和度が 10^3 になった時、TCE のプリュームの先端がその地点を通過したものと定義してプロットした (Calc.)。予備的に、TCE 飽和度が 10^2 とした場合もプロットしたが、結果に大きな変化はなかった。すなわち、先端部の TCE 飽和度分布は極めてシャープであることを示唆している。前節と同様に、残余 NAPL 飽和度を考慮した場合 (with residual) と考慮しなかった場合 (with no residual) をプロットした。

①Run6 (図-13) と Run7 (図-14) を較べると、この両者は模擬地下水面の高さが 1cm 異なるのみで、ほとん

ど同様の実験であるが、実験での TCE プリュームの先端部の軌跡は異なっていた。これは、ガラスビーズの充填の状態や、注入時のわずかな誤差によって生じた実験上の誤差であると考えられる。残余 NAPL 飽和度を考慮した場合と考慮しなかった場合の計算値を較べると、毛管不飽和帯に達したところから両者の違いが大きくなり、カラム底に (高さ=0) に到達する時間は 1 時間ほど異なっていた。しかし、前述したように実験値の誤差が比較的大きかったために、残余 NAPL 飽和度を考慮しなかった場合とした場合ではどちらがより測定値を表現できていたかは判断できなかった。

②一方、Run9 である図-16 に示すように、beads 2 の場合には、残余 NAPL 飽和度を考慮しなかった場合が、カラム底にまで到達しているのに対し、残余 NAPL 飽和度を考慮した場合は、毛管飽和帯の途中で停滞していた。実験値では、最終的にはカラムの底にまで到達しているが、実際にビデオ画像をみると、ガラスカラムの壁面を沿って流れてしまった様子がうかがえた。よって、前節でも述べたが、残余 NAPL 飽和度を考慮することによって、水より比重の大きい DNAPL でも、注入した NAPL が毛管飽和帯の途中で停滞するという現象が表現することができたと言える。③また、注入条件の違いに関しては、bead 1 の Run8 の場合 (図-15) は、実験値と一致する傾向にあったが、beads 2 の Run10 の場合 (図-17) は計算値の方が早く浸透する傾向があった。おそらく、先述したように、同様の実験条件でも浸透速度がかなり異なる可能性もあることから、Run10 の場合は、検証データとして実験値に問題があったことも、実験値と測定値の差の要因であると推察される。

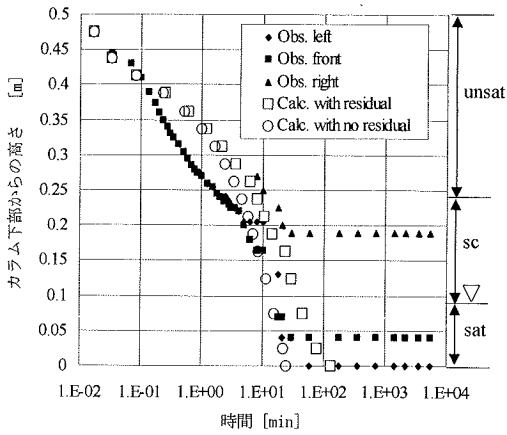


図-13 TCE プリューム先端部の軌跡

(Run 6, beads1, 注入量/注入時間=20mL/4s, 地下水面高さ 9 cm)

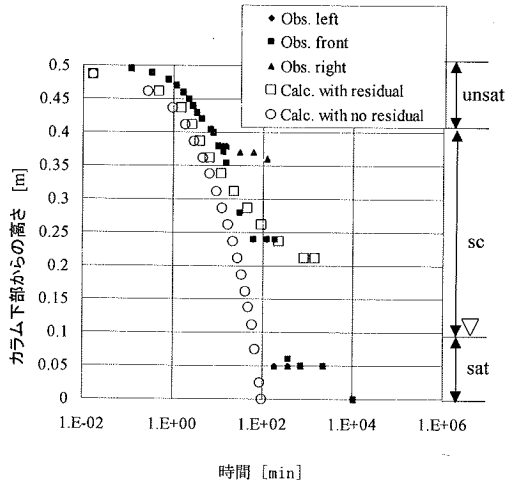


図-16 TCE プリューム先端部の軌跡

(Run 9, beads2, 注入量/注入時間=20mL/180s)

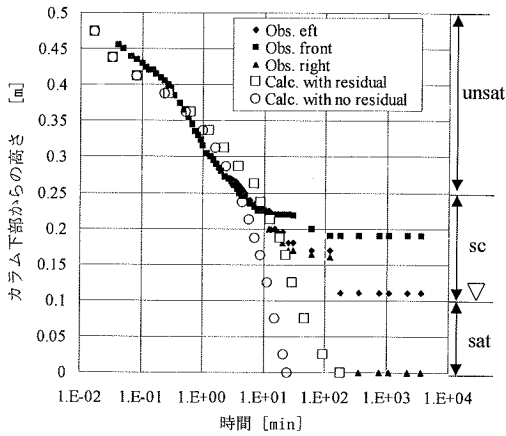


図-14 TCE プリューム先端部の軌跡

(Run 7, beads1, 注入量/注入時間=20 mL/4 s, 地下水面高さ 10 cm)

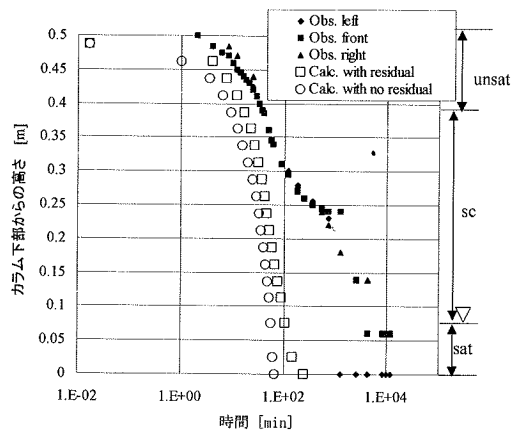


図-17 TCE プリューム先端部の軌跡

(Run 10, beads2, 注入量/注入時間=47mL/2635.5 s)

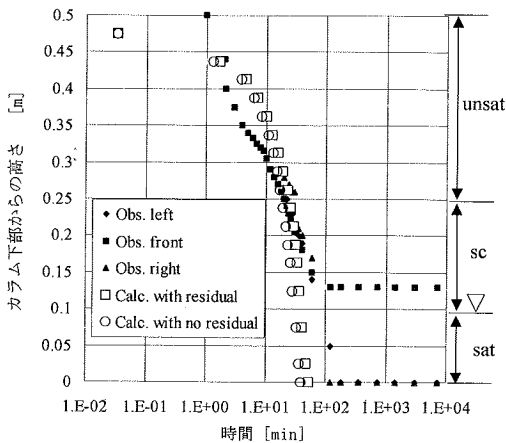


図-15 TCE プリューム先端部の軌跡

(Run 8, beads1, 注入量/注入時間=38mL/2303s)

7. 結論

本研究では、キャピラリーモデルに揮発項を導入した NAPL 鉛直一次元浸透モデルを構築し、TCE 原液の先端部の移動速度、TCE と水の鉛直分布、さらに揮発量の実験値とシミュレーション結果との比較を行った。本研究により得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 本研究により、TCE と水の鉛直分布、揮発量、さらに TCE の浸透速度を表現するためには、残余 NAPL 飽和度を考慮する必要性のあることが示された。
- 2) 2 種類のガラスビーズ粒径の場合に限定されるが、不飽和帯における残余 NAPL 飽和度と水飽和度の間には線形関係が認められた。
- 3) 実験値では、注入強度が小さい場合、カラム中の水がより多く排水されるために、TCE が下方に分布する傾向にあったが、本モデルはその傾向も表現できることが分かった。つまり、注入強度や時間に対して、モデルの追従性が示された。
- 4) 以上より、NAPL 鉛直一次元浸透モデルの実験値との比較を通じて、本研究で提案するモデルが、実際の土壌・地下水汚染対策を行う上で、現場調査では直接的に得ることができない NAPL 原液の浸透速度、到達深さ、鉛直分布に関する情報を提供できることを示した。

参考文献

- 1) Schwillie, F.: Groundwater Pollution by Mineral Oil Products, IAHS-AISH Pub., Vol.103, pp.226-240, 1975.
- 2) Schwillie, F.: Groundwater Pollution in Porous Media by Fluids Immiscible with Water, The Science of the Total Environment, Vol.21, pp.173-185, 1981.
- 3) Schwillie, F., translated by Pankow, J.F.: Dense Chlorinated Solvents in Porous and Fractured Media, Lewis Publishers, USA, 1988.
- 4) Wiedemeier, T.H., Rifai, H.S., Newell, C.J. and Wilson, J.T.: Natural Attenuation of Fuels and Chlorinated Solvents in the Subsurface, John Wiley & Sons, Inc., USA, 1999.
- 5) 例えば, Jin, M., Delshad, M., Dwarakanath, V., Mckinney, D.C., Pope, G.A., Sepchmoori, K., Tilburg, C.E. and Jackson, R.E.: Partitioning Tracer Test for Detection, Estimation, and Remediation Performance Assessment of Subsurface Nonaqueous Phase Liquids, Wat. Resour. Res., Vol.31, No.5, pp.1201-1211, 1995.
- 6) Hirata, T. and Muraoka, K.: Vertical Migration of Chlorinated Organic Compounds in Porous Media, Wat. Res., Vol.22, No.4, pp.481-484, 1988.
- 7) 石井一英, 田中信壽, 松藤敏彦, 東條安匡: 水分不飽和体におけるトリクロロエチレン原液の浸透挙動に関する実験的研究, 環境工学研究論文集, Vol.32, pp.387-396, 1995.
- 8) 石井一英, 古市徹, 田中信壽: 特性の異なる難水溶性有機化合物原液の鉛直浸透挙動に関する実験的考察, 日本地下水学会誌, Vol.40, No.2, pp.105-120, 1998.
- 9) Brutsaert, W.: Numerical Solution of Multiphase Well Flow, Proc. Am. Soc. Civ. Eng., J. Hydraul. Div., 99, pp.1981-2001, 1973.
- 10) Guswa, J.H.: Application of Multi-phase Flow Theory at a Chemical Waste Landfill, Niagara Falls, New York, Proceeding of the Second International Conference on Groundwater Quality Research Natl. Cent. Ground Water Res., Stillwater, Okla., pp.108-111, 1985.
- 11) Faust, C.R.: Transport of Immiscible Fluids Within and Below the Unsaturated Zone: A Numerical Model, Wat. Resour. Res., Vol.21, No.4, pp.587-596, 1985.
- 12) Abriola, L.M. and Pinder, G.F.: A Multiphase Approach to the Modeling of Porous Media Contaminated by Organic Compounds 1. Equation Development, Wat. Resour. Res., Vol.21, No.1, pp.11-18, 1985.
- 13) Abriola, L.M. and Pinder, G.F.: A Multiphase Approach to the Modeling of Porous Media Contaminated by Organic Compounds 2. Numerical Simulation, Wat. Resour. Res., Vol.21, No.1, pp.19-26, 1985.
- 14) Eckberg, D.K. and Sunada, D.K.: Nonsteady Three-Phase Immiscible Fluid Distribution in Porous Media, Wat. Resour. Res., Vol.20, No.12, pp.1891-1897, 1984.
- 15) Lenhard, R.J., Dane, J.H., Parker, J.C. and Kaluarachchi, J.J.: Measurement and Simulation of One-Dimensional Transient Three-Phase Flow for Monotonic Liquid Drainage, Wat. Resour. Res., Vol.24, No.6, pp.853-863, 1988.
- 16) Cary, J.W., McBride, J.F. and Simmons, C.S.: Observations of Water and Oil Infiltration Into Soil: Some Simulation Challenges, Wat. Resour. Res., Vol.25, No.1, pp.73-80, 1989.
- 17) Thomson, N.R., Graham, D.N. and Farquhar, G.J.: One-dimensional Immiscible Displacement Experiments, J. Contam. Hydrol., Vol.10, pp.197-223, 1992.
- 18) Oostrom, M. and Lenhard, R.J.: Comparison of Relative Permeability-Saturation-Pressure Parametric Models for Infiltration and Redistribution of a Light Nonaqueous-phase Liquid in Sandy Porous Media, Adv. Wat. Resour., Vol.21, No.2, 145-157, 1998.
- 19) Host-Madsen, J. and Høgh Jensen, K.: Laboratory and Numerical Investigations of Immiscible Multiphase Flow in Soil, J. Hydrol., Vol.135, pp.13-52, 1992.
- 20) Schroth, M.H., Istok, J.D., Selker, J.S., Oostrom, M. and White, M.D.: Multifluid Flow in Bedded Porous Media: Laboratory Experiments and Numerical Simulations, Adv. Wat. Resour., Vol.22, No.2, pp.169-183, 1998.
- 21) Thiec, P. Le. and Ducreux, J.: A 3-D Numerical Model for Analyzing Hydrocarbon Migration into Soils and Aquifers, Computer Methods and Advances in Geomechanics, Siriwardane

- & Zaman(eds), pp.1165-1170, 1994.
- 22) Van Geel, P.J. and Sykes, J.F.: The Importance of Fluid Entrapment, Saturation hysteresis and Residual Saturations on the Distribution of a Light-than-water Non-aqueous Phase Liquid in a Variably Saturated Sand Medium, *J. Contam. Hydrol.*, Vol.25, pp.249-270, 1997.
 - 23) Huntley, D., Hawk, R.N. and Corley, H.P.: Nonaqueous Phase Hydrocarbon in a Fine-Grained Sandstone 1. Comparison Between measured and Predicted Saturations and Mobility, *Ground Water*, Vol.32, No.4, pp.626-634, 1994.
 - 24) Essaid, H.I., Herkelrath, W.N. and Hess, K.M.: Simulation of Fluid Distributions Observed at a Crude Oil Spill Site Incorporating Hysteresis, Oil Entrapment, and Spatial Variability of Hydraulic Properties, *Wat. Resour. Res.*, Vol.29, No.6, pp.1753-1770, 1993.
 - 25) Parker, J.C., Lenhard, R.J. and Kuppusamy, T.: Modeling Multiphase Contaminant Transport in Ground Water and Vadose Zones, *Proc. NWWA/API Conf. Pet. Hydrocarb. Org. Chem. Ground Water Prev. Defect. Restor.* 1986, pp.189-208, 1986.
 - 26) Kueper, B.H. and Frind, E.O.: Two-Phase Flow in Heterogeneous Porous Media 1.Model Development, *Wat. Resour. Res.*, Vol.27, No.6, pp.1049-1057, 1991.
 - 27) Kueper, B.H. and Frind, E.O.: Two-Phase Flow in Heterogeneous Porous Media 2.Model Application, *Wat. Resour. Res.*, Vol.27, No.6, pp.1059-1070, 1991.
 - 28) Oostrom, M., Hofstee, C., Walker, R.C. and Dane, J.H.: Movement and Remediation of Trichloroethylene in a Saturated Heterogeneous Porous Medium 1.Spill behavior and initial dissolution, *J. Contam. Hydrol.*, Vol.37, pp.159-178, 1999.
 - 29) Miller, C.T., Poirier-McNeill, M.M. and Mayer, A.S.: Dissolution of Trapped Nonaqueous Phase Liquids: Mass Transfer Characteristics, *Wat. Resour. Res.*, Vol.26, No.11, pp.2783-2796, 1990.
 - 30) Powers, S.E., Abriola, L.M. and Weber, Jr. W.J.: An Experimental Investigation of Nonaqueous Phase Liquid Dissolution in Saturated Subsurface Systems; Steady State Transfer Rates, *Wat. Resour. Res.*, Vol.28, No.10, pp.2691-1705, 1992.
 - 31) Imhoff, P.T., Jaffe, P.R. and Pinder, G.F.: An Experimental Study of Complete Dissolution of a Nonaqueous Phase Liquid in Saturated Porous Media, *Wat. Resour. Res.*, Vol.30, No.2, pp.307-320, 1993.
 - 32) Powers, S.E., Abriola, L.M. and Weber, Jr. W.J.: An Experimental Investigation of Nonaqueous Phase Liquid Dissolution in Saturated Subsurface Systems; Transient Mass Transfer Rates, *Wat. Resour. Res.*, Vol.30, No.2, pp.321-332, 1994.
 - 33) Falta, R.W., Javandel I.J., Pruess, K. and Witherspoon, P.A.: Density-Driven Flow of Gas in the Unsaturated Zone due to the Evaporation of Volatile Organic Compounds, *Wat. Resour. Res.*, Vol.25, No.10, pp.2159-2169, 1989.
 - 34) Sleep, B.E. and Sykes, J.F.: Modeling the Transport of Volatile Organics in Variably Saturated Media, *Wat. Resour. Res.*, Vol.25, No.1, pp.1709-1718, 1989.
 - 35) Mendoza, C.A. and Frind, E.O.: Advective-Dispersive Transport of Dense Organic Vapors in the Unsaturated Zone 1.Model Development, *Wat. Resour. Res.*, Vol.26, No.3, pp.379-387, 1990.
 - 36) Mendoza, C.A., and Frind, E.O.: Advective-Dispersive Transport of Dense Organic Vapors in the Unsaturated Zone 2.Sensitivity Analysis, *Wat. Resour. Res.*, Vol.26, No.3, pp.388-398, 1990.
 - 37) Bear, J.: *Dynamics of Fluids in Porous Media*, American Elsevier Publishing Company Inc., pp.457-459, 1972.
 - 38) Scheidegger, A.E.: *The Physics of Flow Through Porous Media* Third Edition, University of Toronto Press, USA, pp.248, 1974.
 - 39) Leverett, M.C.: Capillary Behavior in Porous Solids, *Trans A.I.M.E.*, Vol.133, pp.152-168, 1940.
 - 40) van Geuchten, M.T.H.: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil. Sci. Am. J.*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
 - 41) Lenhard, R.J. and Parker, J.C.: Experimental Validation of the Theory of Extending Two-Phase Saturation-Pressure Relations to Three-Fluid Phase Systems for Monotonic Drainage Paths, *Wat. Resour. Res.*, Vol.24, No.3, pp.373-380, 1988.
 - 42) Parker, J.C., Lenhard, R.J. and Kuppusamy, T.: A Parametric Model for Constitutive Properties Governing Multiphase Flow in Porous Media, *Wat. Resour. Res.*, Vol.23, No.4, pp.618-624, 1987.
 - 43) 赤井浩一, 大西有三, 西垣誠: 有限要素による飽和不飽和浸透流の解析, *土木学会論文報告集*, Vol.264, pp.87-96, 1977.
 - 44) 田井秀人: 衝撃解析プログラムRADIOSSについて—陽解法コードの最近の話題と事例紹介—, *日本機械学会機械力学・計測制御講演論文集*, Vol.A, pp.170-173, 1992.
 - 45) 例えば, Kaluarachchi, J.J. and Parker, J.C.: Multiphase Flow with a Simplified Model for Oil Entrapment, *Transport in Porous Media*, Vol.7, pp.1-14, 1992.
 - 46) Conrad, S.H., Wilson, J.L., Mason, W.R. and Peplinski, W.J.: Visualization of Residual Organic Liquid Trapped in Aquifers, *Wat. Resour. Res.*, Vol.28, No.2, pp.467-478, 1992.
 - 47) Larson, R.G., Davis, H.T. and Scriven, L.E.: Displacement of Residual Nonwetting Fluid from Porous Media, *Chemical Engineering Science*, Vol.36, pp.75-85, 1981.
 - 48) Chatzis, I., Morrow, N.R. and Lim, H.T.: Magnitude and Detailed Structure of Residual Oil Saturation, *Society of Petroleum Engineers Journal*, Vol.4, pp.311-326, 1983.
 - 49) Mercer, J.W. and Cohen, R.M.: A Review of Immiscible Fluids in the Subsurface: Properties, Models, Characterization and Remediation, *J. Contam. Hydrol.*, Vol.6, pp.107-163, 1990.
 - 50) Jarsjo, J., Destouni, G. and Yaron, B.: Retention and Volatilization of Kerosene: Laboratory experiments on glacial and post-glacial Soils, *J. Contam. Hydrol.*, Vol.17, pp.167-185, 1994.
 - 51) Wilson, J.L., Conrad, S.H., Mason, W.R., Peplinski, W. and Hagan, E.: Laboratory Investigation of Residual Liquid Organics from

- Spills, Leaks and the Disposal of Hazardous Wastes in Groundwater, EPA/600/S6-90/004, 1990.
- 52) Ryan, R.G and Dhir, V.K.: The Effect of Soil-Particle Size on Hydrocarbon Entrapment Near a Dynamic Water Table, J. Soil Contam., Vol.2, No.1, pp.59-92, 1993.
- 53) Ryan, R.G and Dhir, V.K.: The Effect of Interfacial Tension on Hydrocarbon Entrapment and Mobilization Near a Dynamic Water Table, J. Soil Contam., Vol.5, No.1, pp.9-34, 1996.
- 54) Wilkins, A.D., Abriola, L.M. and Pennell, K.D.: An Experimental Investigation of Rate-limited Nonaqueous Phase Liquid Volatilization in Unsaturated Porous Media; Steady State Mass Transfer, Wat. Resour. Res., Vol.31, No.9, pp.2159-2172, 1995.

(2003.3.31 受付)

DEVELOPMENT OF ONE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODEL FOR RESIDUAL NAPL INFILTRATING IN UNSATURATED/SATURATED POROUS MEDIA

Kazuei ISHII and Tohru FURUICHI

In this study, applicability of one-dimensional infiltration model for NAPL pure liquid behavior in unsaturated/saturated porous media was investigated. The progressing rate of TCE front in glass beads layers, vertical distribution of TCE and water, and total amount of volatilization of TCE were used as observed values to evaluate the model. The result revealed that it is needed to introduce residual NAPL saturation in unsaturated/saturated zones to the model in order to present the observed data. The residual NAPL saturation tended to increase with water saturation in unsaturated zone. In addition, the model could present the TCE distribution when an injection rate was changed.