

## 水と軽油の非混合モデルとその適用性の検討

仲 沢 武 志

### 概 要

軽油のような水に溶けない物質に対する行政指導がガイドラインとして提示されている。よって、このような物質の地盤内挙動を把握することは、汚染領域の把握だけでなく浄化においても急務であろうと考えられる。非水溶性物質が地盤や地下水の中を広がる様子を把握するには、従来の物質移行拡散解析手法では不十分な可能性も高い。そこで、非水溶性物質の地盤内挙動を多相系流体モデルで解析する手法を開発した。また、その適用性を確認するために1次元カラム試験ならびに2次元拡散試験を軽油で実施し解析結果と比較した。計算結果は、1次元カラム試験では排水過程・浸水過程ともにほぼ良好なものであった。2次元拡散試験については、計算結果はやや狭い領域を予測したものの比較的良好的なものとなった。

### Applicability of an immiscible permeability model for water and light oil in grounds

### Abstract

The Ministry of the Environment in Japan has previously released “Guidelines on the Control of Oil Contamination” including the treatments of immiscible materials like light oil. Therefore, it is urgent to comprehend the behaviors of these immiscible materials in grounds for not only predicting contaminated areas but also planning remediation methods. It is difficult to apply conventional dispersion analytical models to predict the behavior of the immiscible contaminants in grounds. Therefore, a new model to predict these behaviors was developed based on a model for multiphase fluid systems. To verify the applicability of the proposed model, one dimensional column tests and two dimensional dispersion tests were carried out by using light oil as an immiscible contaminant in ground water. The results showed that 1) in one dimensional column tests the prediction results were similar to the test results both in the injection process of light oil to water and the injection process of water to light oil, 2) in two dimensional tests the prediction results were also similar to the test results though the targeted prediction areas were limited to the vicinity of injection opening.

キーワード： 軽油 汚染地盤 透水  
数値解析

## §1. はじめに

環境問題に社会的な関心が寄せられている中、土壌や地下水の汚染に関する問題も注目され始め、環境基準や土壌汚染対策法が制定されている。その一環として、近年では油に対しても「油汚染に関するガイドライン」が環境庁から提示されている。

従来、重金属系のような水溶性物質の場合、地盤中の物質挙動は地下水の浸透流解析とその結果から得られる流速を考慮した物質の移行拡散解析で予測されている。近年のガイドラインの制定によって油にも対応できる解析手法が必要となってきた。よく知られているように油や有機溶剤のような NAPL といわれる物質は水に溶けないため、その解析手法は、従来の物質移行拡散解析では十分に対応できない。そこで、本文では、NAPL に対応した解析手法について考察し、その適用性を示す。

## §2. 解析手法の展開

ここでは、水に溶けない物質の解析に用いる支配方程式の一般的展開を記述し、有限要素法での離散化について記す。

### 2.1 支配方程式

水-NAPL2相流において各流体の密度を一定とすると、各相における連続の式(Richards)は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \phi \frac{\partial S^{(w)}}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x_i} (k^{(rw)} k_{ij}^{(s)} \frac{\partial}{\partial x_j} (\varphi^{(w)} + z)) \\ \phi \frac{\partial S^{(N)}}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x_i} (k^{(rN)} \frac{k_{ij}^{(s)}}{\mu^{(N)}} \frac{\partial}{\partial x_j} (\varphi^{(N)} + \rho^{(N)} z)) \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、

- $k_{ij}^{(s)}$ : 地盤の透水係数、 $k^{(rw)}$ : 水の相対透過度
- $k^{(rN)}$ : NAPL の相対透過度、 $\varphi^{(w)}$ : 水の圧力水頭、
- $\varphi^{(N)}$ : NAPL の圧力水頭、 $\rho^{(N)}$ : NAPL の比重、
- $\mu^{(N)}$ : NAPL の比粘性、 $S^{(w)}$ : 水の飽和度、
- $S^{(N)}$ : NAPL の飽和度

式(1)は流体の流れを水頭圧と飽和度で記述した混合型の支配方程式となっている。式(1)において、2相系の流れを考える場合には次式が成り立つ。

$$S^{(w)} + S^{(N)} = 1 \quad (2)$$

また、毛管圧  $\varphi^{(c)}$  を次式で定義する。

$$\varphi^{(c)} = \varphi^{(w)} - \varphi^{(N)} \quad (3)$$

式(2)と式(3)を用いて式(1)を  $\varphi^{(w)}$  および  $\varphi^{(N)}$  を変数とした水頭圧型の支配方程式に変形する。

$S^{(w)}$  や  $S^{(N)}$  が毛管圧  $\varphi^{(c)}$  の関数であると考え、式(1)に適用すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \phi \frac{\partial S^{(w)}}{\partial t} &= \phi \frac{\partial S^{(w)}}{\partial \varphi^{(c)}} \frac{\partial \varphi^{(c)}}{\partial t} = \phi \frac{\partial S^{(w)}}{\partial \varphi^{(c)}} \frac{\partial}{\partial t} (\varphi^{(w)} - \varphi^{(N)}) \\ &\equiv C(\varphi^{(c)}) \frac{\partial \varphi^{(w)}}{\partial t} - C(\varphi^{(c)}) \frac{\partial \varphi^{(N)}}{\partial t} \\ &= \frac{\partial}{\partial x_i} (k^{(rw)} k_{ij}^{(s)} \frac{\partial}{\partial x_j} (\varphi^{(w)} + z)) \end{aligned} \quad (4-1)$$

$$\begin{aligned} \phi \frac{\partial S^{(N)}}{\partial t} &= \phi \frac{\partial (1 - S^{(w)})}{\partial \varphi^{(c)}} \frac{\partial \varphi^{(c)}}{\partial t} \\ &= -\phi \frac{\partial S^{(w)}}{\partial \varphi^{(c)}} \frac{\partial}{\partial t} (\varphi^{(w)} - \varphi^{(N)}) \\ &\equiv -C(\varphi^{(c)}) \frac{\partial \varphi^{(w)}}{\partial t} + C(\varphi^{(c)}) \frac{\partial \varphi^{(N)}}{\partial t} \\ &= \frac{\partial}{\partial x_i} (k^{(rN)} \frac{k_{ij}^{(s)}}{\mu^{(N)}} \frac{\partial}{\partial x_j} (\varphi^{(N)} + \rho^{(N)} z)) \end{aligned} \quad (4-2)$$

ここに、 $C(\varphi^{(c)})$  は比水分容量と呼ばれている。

さらに、 $h^{(w)} \equiv \varphi^{(w)} + z$ 、 $h^{(N)} \equiv \varphi^{(N)} + \rho^{(N)} z$  とした上で座標  $z$  は時間に無関係と考えると、式(4-1)および式(4-2)は次のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} C(\varphi^{(c)}) \frac{\partial h^{(w)}}{\partial t} - C(\varphi^{(c)}) \frac{\partial h^{(N)}}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x_i} (k^{(rw)} k_{ij}^{(s)} \frac{\partial h^{(w)}}{\partial x_j}) \\ -C(\varphi^{(c)}) \frac{\partial h^{(w)}}{\partial t} + C(\varphi^{(c)}) \frac{\partial h^{(N)}}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x_i} (k^{(rN)} \frac{k_{ij}^{(s)}}{\mu^{(N)}} \frac{\partial h^{(N)}}{\partial x_j}) \end{aligned} \quad (5)$$

### 2.2 有限要素法による離散化

式(5)を有限要素法で離散化する。両式に重み関数  $W^m$  を掛けて体積積分すると同時に、水頭圧  $\varphi^{(w)}$  および  $\varphi^{(N)}$  に形状関数  $N^n$  を用いて離散化すると次式を得る。

$$\begin{aligned} &[\int_V W^m C(\varphi^{(c)}) \frac{\partial N^n}{\partial t} dV] \hat{h}^{(w)n} - [\int_V W^m C(\varphi^{(c)}) \frac{\partial N^n}{\partial t} dV] \hat{h}^{(N)n} \\ &= [\int_V W^m \frac{\partial}{\partial x_i} (k^{(rw)} k_{ij}^{(s)} \frac{\partial N^n}{\partial x_j}) dV] \hat{h}^{(w)n} \\ &= [\int_V n_i W^m (k^{(rw)} k_{ij}^{(s)} \frac{\partial N^n}{\partial x_j}) dV] \hat{h}^{(w)n} \\ &- [\int_V \frac{\partial W^m}{\partial x_i} (k^{(rN)} k_{ij}^{(s)} \frac{\partial N^n}{\partial x_j}) dV] \hat{h}^{(w)n} \end{aligned} \quad (6-1)$$

$$\begin{aligned}
 & -\left[\int_V W^m C(\varphi^{(c)}) \frac{\partial N^n}{\partial t} dV\right] \hat{h}^{(w)n} + \left[\int_V W^m C(\varphi^{(c)}) \frac{\partial N^n}{\partial t} dV\right] \hat{h}^{(N)n} \\
 & = \left[\int_V W^m \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k^{(rN)} \frac{k_{ij}^{(s)}}{\mu^{(N)}} \frac{\partial N^n}{\partial x_j}\right) dV\right] \hat{h}^{(N)n} \\
 & = \left[\int_V n_i W^m \left(k^{(rN)} \frac{k_{ij}^{(s)}}{\mu^{(N)}} \frac{\partial N^n}{\partial x_j}\right) dV\right] \hat{h}^{(N)n} \\
 & - \left[\int_V \frac{\partial W^m}{\partial x_i} \left(k^{(rN)} \frac{k_{ij}^{(s)}}{\mu^{(N)}} \frac{\partial N^n}{\partial x_j}\right) dV\right] \hat{h}^{(N)n}
 \end{aligned} \tag{6-2}$$

さらに、時間に関して後退差分を適用すると式(6-1)および式(6-2)は次式となる。

$$\begin{aligned}
 & \left[\int_V W^m C(\varphi^{(c)}) N^n dV\right] \hat{h}_{(t)}^{(w)n} - \left[\int_V W^m C(\varphi^{(c)}) \frac{\partial N^n}{\partial t} dV\right] \hat{h}_{(t)}^{(N)n} \\
 & + \Delta t \left[\int_V \frac{\partial W^m}{\partial x_i} \left(k^{(rw)} k_{ij}^{(s)} \frac{\partial N^n}{\partial x_j}\right) dV\right] \hat{h}_{(t)}^{(w)n} \\
 & = \Delta t \left[\int_V n_i W^m \left(k^{(rw)} k_{ij}^{(s)} \frac{\partial N^n}{\partial x_j}\right) dV\right] \hat{h}_{(t)}^{(w)n} \\
 & + \left[\int_V W^m C(\varphi^{(c)}) N^n dV\right] \hat{h}_{(t-1)}^{(w)n} - \left[\int_V W^m C(\varphi^{(c)}) \frac{\partial N^n}{\partial t} dV\right] \hat{h}_{(t-1)}^{(N)n}
 \end{aligned} \tag{7-1}$$

$$\begin{aligned}
 & - \left[\int_V W^m C(\varphi^{(c)}) N^n dV\right] \hat{h}_{(t)}^{(w)n} + \left[\int_V W^m C(\varphi^{(c)}) \frac{\partial N^n}{\partial t} dV\right] \hat{h}_{(t)}^{(N)n} \\
 & + \Delta t \left[\int_V \frac{\partial W^m}{\partial x_i} \left(k^{(rN)} \frac{k_{ij}^{(s)}}{\mu^{(N)}} \frac{\partial N^n}{\partial x_j}\right) dV\right] \hat{h}_{(t)}^{(N)n} \\
 & = \Delta t \left[\int_V n_i W^m \left(k^{(rN)} \frac{k_{ij}^{(s)}}{\mu^{(N)}} \frac{\partial N^n}{\partial x_j}\right) dV\right] \hat{h}_{(t)}^{(N)n} \\
 & - \left[\int_V W^m C(\varphi^{(c)}) N^n dV\right] \hat{h}_{(t-1)}^{(w)n} + \left[\int_V W^m C(\varphi^{(c)}) \frac{\partial N^n}{\partial t} dV\right] \hat{h}_{(t-1)}^{(N)n}
 \end{aligned} \tag{7-2}$$

よって、式(7-1)および式(7-2)に基づいて有限要素プログラムを作成する。

なお、ここで記号を整理すると、離散化された後の  $\hat{h}_t^{(w)n}$  や  $\hat{h}_t^{(N)n}$  において、(w) および (N) はそれぞれ水と NAPL を表わし、n は要素を構成する節点、さらに (t) は時間ステップを表わす。

### 2.3 不飽和特性

式(7-1)および式(7-2)で実際に計算するためには、透過度を表わす  $k^{(rw)}$  や  $k^{(rN)}$  および比水分容量である  $C(\varphi^{(c)})$  に対して条件を与えなければならない。ここでは、van Genuchten モデルで毛管圧  $\varphi^{(c)}$  と水の有効飽和度  $S_{we}$  の関係を表わし、透過度に関しては Mualen モデルを用いることとする。各式を以下に示す。

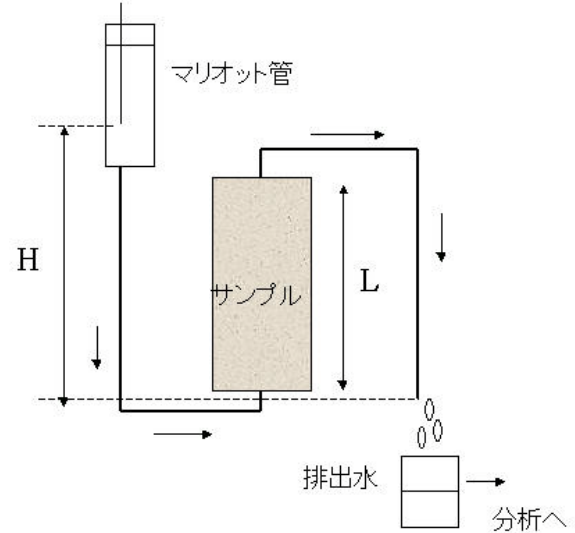


図1 1次元試験概要

$$S_{we} = \frac{(S_w - S_{wr})}{(1 - S_{wr} - S_{or})} = \frac{1}{\{1 + (\alpha \varphi^{(c)})^\beta\}^\gamma} \tag{8}$$

$$k^{(rw)} = S_{we}^{1/2} \{1 - (1 - S_{we}^{1/\gamma})^\gamma\}^2 \tag{9}$$

$$k^{(rN)} = (1 - S_{we})^{1/2} (1 - S_{we}^{1/\gamma})^{2\gamma}$$

ここに、 $S_{wr}$ 、 $S_{or}$  はそれぞれ水と NAPL の残留飽和度である。また、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma = 1 - 1/\beta$  はモデル定数で、土質試料の特性値である。

以上のように定式化された解析手法を既往の研究<sup>1)</sup>と比較し十分な一致を確認した。

### §3. 1次元カラム試験への適用

§2に示した支配方程式ならびに離散化手法を用いて解析プログラムを開発したので、ここではその適用性について記述する。適用性を示す例題としてまず1次元カラム試験での排水過程と浸水過程を考える。

#### 3.1 実験概要

1次元カラム試験の概要を記述する。試験装置の概要は図1に示すように、一定の水頭を維持した形で実施することを基本とする。水や NAPL の経路はそれぞれ単独とし、マリオット管を用いて液体を供給する。本文では、NAPL として軽油での試験を実施した。土試料は豊浦標準砂とし、突き固めによって試験体を作成した。試験体の作成手順を以下に示す。

- 所定の重量の乾燥した標準砂に重量で 20%の水道水を加える。

・内径 7.5cm 高さ 10cm の中空円筒へ 3 層に分けて突き固めによって試験試料土を詰める。この際、重量 2.5kgf のランマーを各層 10 回自由落下させることで試験体を突き固めた。その時の土試料の乾燥密度はほぼ 1.53gf/cm<sup>3</sup>、透水係数は  $5 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$  となった。

・上記の手順で作成した試験体を試験装置に設置し、試験を開始した。その後の過程は、軽油で飽和した試験体に水を注入する浸水過程と水で飽和した試験体に軽油を注入する排水過程で異なる。

(1) 浸水過程

上記手順で作成した試験体に軽油をまず排出液が完全に軽油となるまで注入する。その後、水を一定の水頭で流し込み、排出液をほぼ一定の時間間隔でサンプリングした。その後、排出された各液体の水と軽油の混合比を分析した。

(2) 排水過程

上記手順で作成した試験体に水を注入する。この場合には、排出経路の管から水だけが排出され、気泡を含むことがない段階まで通水した。その後、軽油を一定の水頭で流し込み、排出液をほぼ一定の時間間隔でサンプリングした。その後、排出された各液体の水と軽油の混合比を分析した。

実験結果は、後述する解析との比較とともに以下に示す。

3.2 解析との照合

§ 2 の式 (7-1) および式 (7-2) に基づく有限要素法での解析結果を実験結果と共にここに示す。試験体は実際には円筒状ではあるが、ここでは 2 次元平面モデルで計算を実施している。

計算結果と実験結果との照合を図 2 および図 3 に示す。図 2 は排水過程の状況を示したものである。両試験は試験体の高さは同じで水位差を変えた状態で実施した。実験結果と計算結果は良好に一致し、排水過程における本計算手法の適用は確認されたものと思われる。ただし、排水過程ではここで示した条件以外に水位差を 20cm および 25cm としたのもも実施したが、結果を示した実験結果と同程度の時間スケールで試験体から軽油の排出が確認されなかったので実験を停止し、測定不能と扱った。図 3 には浸水過程の結果を示した。水位差が低いレベルにおいては実験結果と計算結果に若干の隔たりが見られるが、大きくなるにつれてその隔たりは小さくなる傾向が見られる。なお、ここでの計算には式 (8) や式 (9) の不飽和パラメータに、 $\alpha = 0.45$ 、 $\beta = 4.0$  を用いている<sup>1)</sup>。

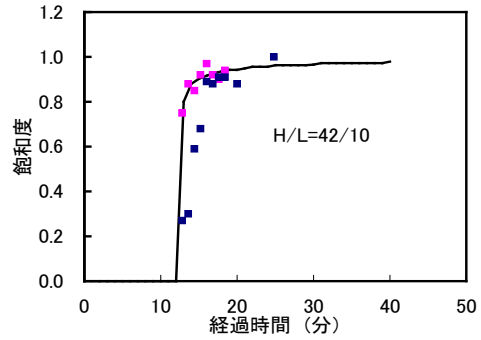


図2(a)排水過程

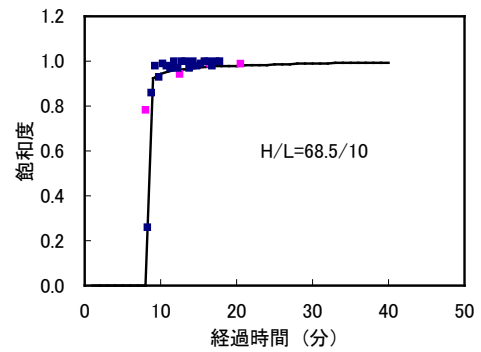


図2(b)排水過程

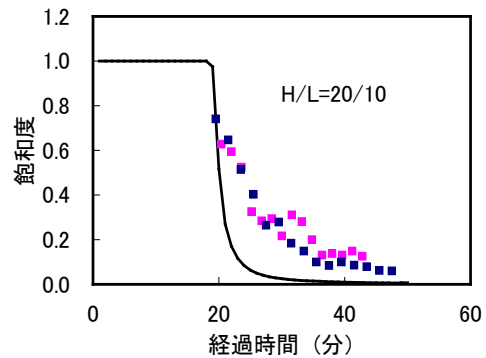


図3(a)浸水過程

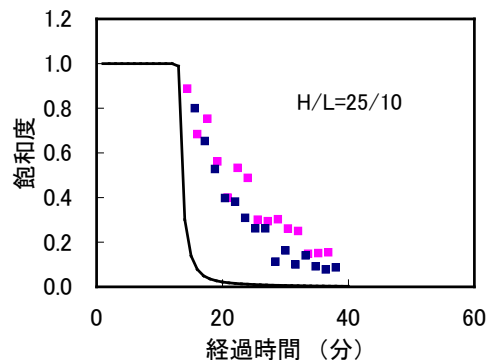


図3(b)浸水過程

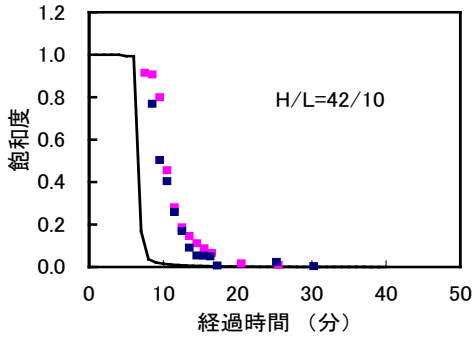


図3(c)浸水過程

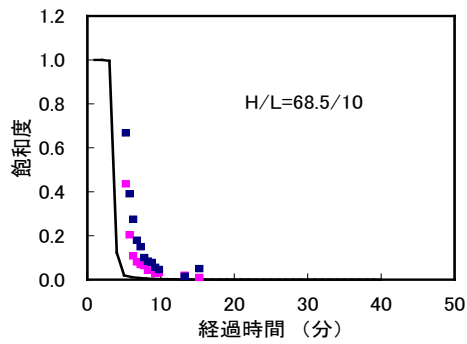


図3(d)浸水過程

#### §4. 2次元模型試験への適用

先の章で1次元問題への適用性を検討したわけであるが、ここではさらなる適用性を確認するために2次元試験を実施し、解析結果との照合を示す。

実験概要を図4に示す。試験体はアクリルで構成された容器を作成し、ガラスビーズを内部に詰めることで作成した。

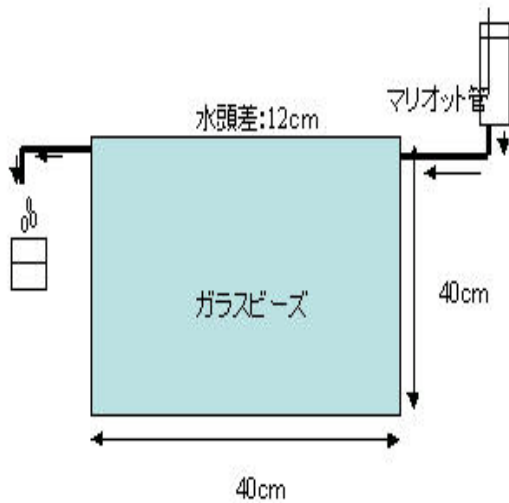


図4 2次元試験概要

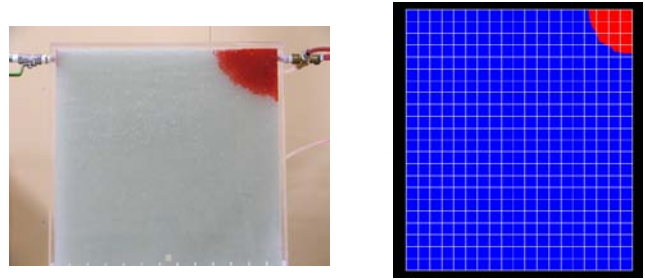


図5(a) 実験結果(注入開始後1分)

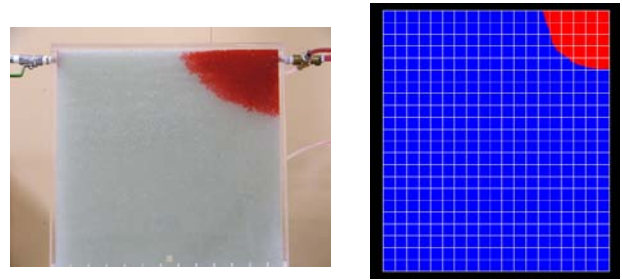


図5(b) 実験結果(注入開始後2分)

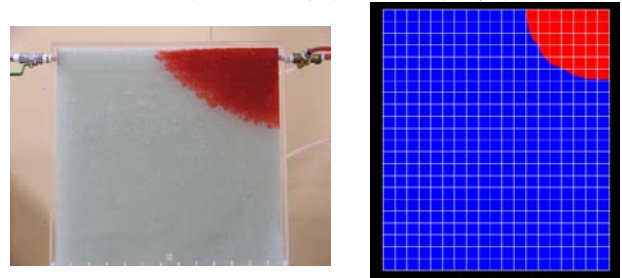


図5(c) 実験結果(注入開始後3分)

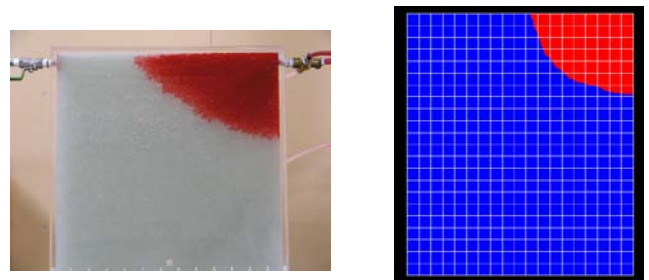


図5(d) 実験結果(注入開始後4分)

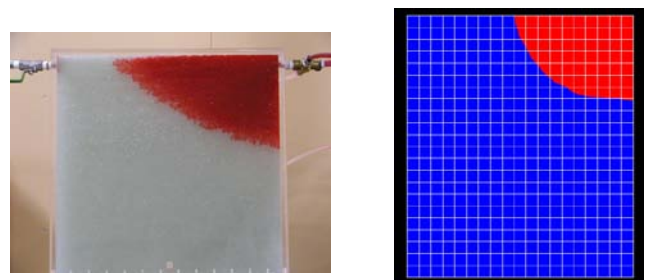


図5(d) 実験結果(注入開始後5分)

実験結果と計算結果との照合を図5に示す。各ステップ間の時間刻みは1分間である。なお、本試験体の透水係数は $3 \times 10^{-1} \text{ cm/sec}$ であり、不飽和パラメータは1次元カラム試験と同じ値を仮定した。

時間の進行とともに計算結果の挙動は遅くなる傾向にあるが両者はほぼ良好に一致しているものと思われる。ここでの若干の隔たりは、不飽和パラメータの詳細な検討などから解消される可能性があるものと考えている。

## §5. まとめ

ここでの結果を以下にまとめる。

- 1) 圧力型の多相流体浸透挙動を表わす支配方程式から計算プログラムを作成した。既往の研究と比較して遜色ない一致を得た。
- 2) 豊浦標準砂による1次元カラム試験を、排水過程と浸水過程で実施した。さらに、ここで作成した計算プログラムによりその挙動を比較的良好に表現できることを把握した。
- 3) ガラスビーズによる2次元模型試験を実施し、1次元カラム試験と同様にその挙動を計算した。若干時間遅れはあるものの計算結果は実験結果を良好に表現できることを把握した。

## 参考文献

- 1) 日比義彦、藤縄克之、藤原幸彦: 多孔体中における水-NAPL2相流の数値モデルの比較、土木学会論文集、No.720, VII-25, 2002



仲沢 武志

## ひとこと

水に溶ける物質の汚染だけでなく水に溶けない物質に関しても今後対応することが多くなると思われる。本文を契機としてこの方面の展開をしたい。