

日本道路公団 正会員 田村道昭
 大阪大学工学部 正会員 村岡浩爾
 大阪大学工学部 正会員 玉井昌宏

1. はじめに

揮発性有機塩素化合物(VOC)による地下水汚染の数値解析に関する既往の研究成果を概観すると、飽和帯あるいは不飽和帯の汚染機構を別々に取り扱ったものが大半であることがわかる。飽和帯におけるVOCの挙動解析には、通常の移流拡散型の輸送方程式が用いられる。これに対して、不飽和帯において水と空気の運動を考慮する場合には、水溶液状態と気相のVOCを別々の輸送方程式によって解析することが必要となる。これらの方法を基礎として、飽和帯と不飽和帯を同時に解析しようとするれば、地下水面上下の領域に対して別々の輸送方程式を用い、地下水面境界において何らかの条件により解を接続させることになる。こうした方法は水分移動を考慮しなくてよいような場合に対しては有効であるが、そのような理想的な状況が得られることは、実際の汚染現場においては極めて希であろう。鉛直方向の水分移動を考慮する場合には、地下水面の位置によって、計算メッシュを移動させるなどの複雑な数値解析が必要となるだろう。本研究の目的は、このような煩雑さを避けるために、従来用いられてきた不飽和帯型の数値モデルを飽和帯にまで拡張利用することにより、飽和・不飽和両帯内のVOCの挙動を同一の方程式系によって解析する方法を提案することである。

2. 基礎方程式

ここで、従来の不飽和帯用の数値モデルを飽和帯にまで拡張利用する理由について、以下の2点を補足しておく。まず第一の理由として、地下水面より下方の飽和帯といえども、空隙が100%水で満たされているような理想的な状態が確立されているかどうかは明確ではないということである。つまり、物理的に意味がないにせよ、飽和帯内に微量な空気あるいは微小な気泡が全く存在していないと言う補償はない。見方を変えれば、数値計算においてもほとんど水溶液相のVOCの汚染挙動に影響しないことが確認されておれば、僅かに気相が存在することに何ら問題はないと判断される。第二の理由は、不飽和帯といえども、地下水面近傍では飽和度も非常に大きく、そこでの汚染機構は飽和帯内とほとんど差異はない、あるいは、飽和帯内の汚染機構に強く影響されていると考えられることである。にもかかわらず、不飽和帯のみを対象として地下水面上で境界条件を与えるような解析方法を用いるならば、解を予め与えているのに等しいと考えるべきである。

本研究では不飽和帯のVOCの挙動は以下の式¹⁾により解析する。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi S_k C_k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\phi S_k D_{kij} \frac{\partial C_k}{\partial x_j} \right) - (-1)^k \phi S_2 \lambda_H (C_2 - HC_1) \quad (1)$$

ここで、添字 k は水溶液相($k=1$)あるいは空気相($k=2$)であることを示す。すなわち C_1, C_2 はそれぞれ水溶液中と空気内のVOC濃度ということになる。 S_k : k 相の飽和度、 D_{kij} : k 相内の拡散係数、 λ_H :ガス発生速度、 H :無次元ヘンリー一定数である。飽和帯においては $S_2=0$ となり、(1)式を解くことができない。そこで、上述のごとく、飽和帯内においても極く僅か空気が残留していると仮定して解析する。上式には移流項が含まれていないが、これは後述する検証実験が各相の流速を考慮する必要が無いような状況で実施されたからである。なお、定常な水分分布を計算するためにBearら²⁾の式を用いた。

3. 検証実験の概要

この検証実験では、図-1に示すように、初期状態として飽和帯内で1)明確な濃度界面が形成されており、2)定常な水分分布を持つ不飽和帯の中をVOCが拡散するような状況を想定している。まず、2)のために、粒径1mmのガラスビーズを充填した上下に分割可能な鉛直一次元カラム内に、VOCを含まない水

で定常な水分分布を作成する。この時、上下カラムの継ぎ目の位置は、地下水面より下になっている。次に、水分分布が変化しないように、大きな水槽内にカラムを浸しながらカラムを分割し、下部カラムをVOC水溶液を満たしたものと瞬時に交換し、1)の状況を得る。但し、実際にはカラムの交換は有限な時間で行われるし、加えられる様々な「擾乱」の影響についても明確ではない。

実験は20℃に設定された恒温室内で行われた。また、一次元カラム内の水溶液相と気相内のVOC濃度分析にはFIDガスクロマトグラフを用いた。実験期間は5日間とした。

4. 計算結果

表-1に計算で用いた物性値を示す。計算初期条件は実験開始後の実測濃度値を採用している。

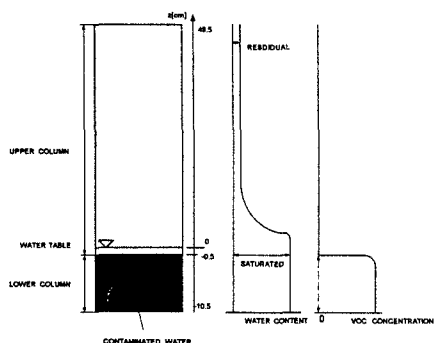


図-1 実験の概要

表-1 水理諸元	
パラメータ	数値
空隙率(ϕ)	0.4
残留飽和度	0.042
屈曲度	0.66
空気中の拡散係数	$0.083(\text{cm}^2/\text{s})$
水中の拡散係数	$5.0 \times 10^{-5}(\text{cm}^2/\text{s})$
無次元ヘンリー定数 H	0.38
ガス発生速度 λ_H	$1.1 \times 10^{-5}(1/\text{s})$

図-2に実験結果と計算値との比較を示す。気相濃度は時間の経過に伴い単調に増加する傾向を示すが、計算結果は分布形状、絶対値ともに実験値の傾向を再現していることがわかる。但し、計測の困難さにより、不飽和帯内の液相濃度データは得られていない。図-3に示すように $Z > 10(\text{cm})$ の領域では液相濃度分布は気相のそれと概ね相似な形状を示している。これは拡散速度（係数）の差異により、この領域の濃度分布が気相濃度に支配されていることを表しているものと判断できる。 $0 < Z < 10(\text{cm})$ の区間では両者の分布形状に差異が現れている。水の飽和度が大きくなる領域では、水溶液相と気相の汚染物質の輸送が同程度の規模で生じるようになると推察される。図-4において液相濃度分布の拡大図を示しているが、 $Z = -5.5, -10(\text{cm})$ における実験値と計算結果は比較的一致している。これに対して、それより浅い位置で両者の一致は悪い。これは既述のとおり実験の初期条件を作成する際の様々な「擾乱」が影響していると考えられる。

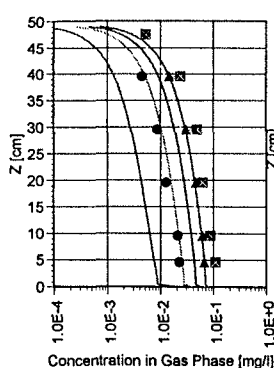


図-2 気相濃度

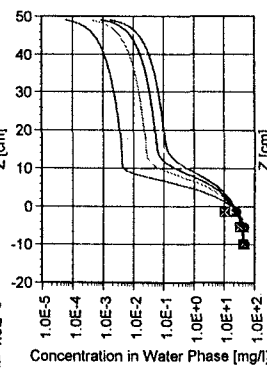


図-3 液相濃度

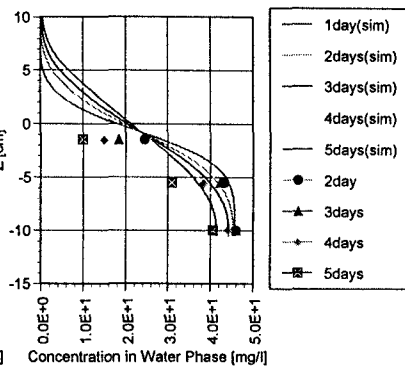


図-4 液相濃度（拡大図）

（参考文献）

- 1) Sleep, B.E. and Sykes, J.F. : Modeling the transport of volatile organics in variably saturated media, Water Resources Research, Vol.25, No.1, pp. 81-92, 1989.
- 2) Bear, J. : Dynamics of fluids in porous media, Americal Elsevier, 1972.