

大阪大学大学院 学生会員 ○八木誠吾

大阪大学工学部 正会員 村岡浩爾

1. はじめに

地下水汚染を引き起こしているトリクロロエチレンやテトラクロロエチレンなどは、DNAPL(Dense Non-Aqueous Phase Liquid)と呼ばれ、比重が水よりも重く、難水溶性を示す物質である。DNAPL は地中においては地下水面上や飽和帯中に滞留しており、徐々に地下水へ溶解し汚染を引き起こす。地下水位は季節的・時間的に変動するために、DNAPL の溶解現象は地下水位変動に影響を受けると考えられる。そこで本研究では、地下水位変動を伴う飽和帯中における DNAPL の溶解現象について、まず鉛直 1 次元カラムを用いた室内実験を行った。さらにその現象をモデル化し、鉛直 1 次元の DNAPL 溶質輸送を数値計算により再現して、地下水位変動が汚染の拡がりに与える影響について考察した。

2. 鉛直 1 次元カラム実験

図 1 に示すような鉛直 1 次元カラム内にガラスビーズ（粒径 1mm）を充填し、飽和帯・不飽和帯を模した多孔体を作る。そして飽和帯中に DNAPL（今回はトリクロロエチレン）を図 1 の $y=0$ の位置に層状に滞留させる。その後併設している水タンクの水量を調節しカラム内の水位を変動させ、実験を開始する。水位変動は図 2 に示すような振幅 $A(\pm 10\text{cm})$ 、周期 $T(6 \text{ 時間})$ となるパターンを与えた。ここで地下水面の初期位置を $\eta=0$ とする。実験開始後各時間毎に、飽和帯中の試料を採取・濃度分析を行い、DNAPL 溶質輸送を調べた。その実験結果を図 3 に示す。実験結果は縦軸に鉛直方向の DNAPL 滞留位置からの距離 y を振幅 A で無次元化した値、横軸は濃度を飽和濃度で無次元化した値で示す。この結果を見ると、地下水位の変動によって DNAPL の滞留位置付近では高濃度の分布が見られ、さらに水位変動にあわせてその高濃度の分布が鉛直方向に移動していることがわかる。この結果より、地下水位変動は DNAPL の溶解及び溶質の輸送現象に大きく影響を及ぼすことが明らかになった。

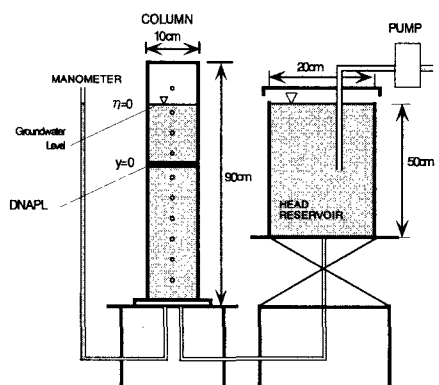


図 1：実験装置

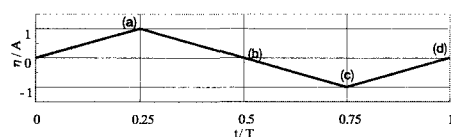


図 2：水位変動

3. 1 次元数値計算

次に、鉛直 1 次元における地下水位変動を伴う、飽和帯中での DNAPL の溶解・輸送を数値計算で再現する。この時 DNAPL 溶質輸送基礎式は次の(1)式に示す 1 次元移流拡散方程式である。

$$\theta \frac{\partial C_L}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial C_L}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (\alpha_L \bar{v} + \theta D_L^*) \frac{\partial C_L}{\partial y} \right\} \quad (1)$$

ここで、 C_L : 飽和帯中の汚染濃度 $[\text{M/L}^3]$ 、 θ : 空隙率、 $\bar{v}$: 地下水位変動を伴う y 方向ダルシー

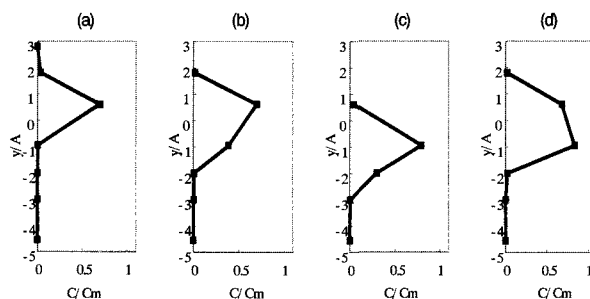


図 3：実験結果

流速($\bar{v}=d\eta/dt$)[L/T]、 α_L :縦方向分散能[L]、 τ :屈曲度、 D^*_L :飽和帯中の分子拡散係数[L²/T]。図 4 のように DNAPL が飽和多孔体中に滞留している状態を鉛直 1 次元(y 方向)で考える。DNAPL が単球形で単位面積当たり($n \times n$)個存在し(図 4 拡大図)、不動であると仮定する。村岡¹⁾は一樣な流れ v' の中に滞留している単球形(半径: r (t), 表面積 S , 体積 V)の TCE の溶解について、無次元溶解定数: α を用いた次式を与えている。

$$dV/dt = -\alpha v'S \tag{2}$$

本研究でも、地下水位変動に伴う流れによって DNAPL の溶解現象は影響を受けていることを考慮し、一樣な流れ v' を地下水位変動による鉛直方向のダルシー流速 $\bar{v}$ として(2)式を用い、図 4 に示すような概念から污染源境界での汚染濃度 $C_{L0}(t)$ [M/L³] を次式で与える。

$$C_{L0}(t) = 4\pi\rho\alpha n^2(r_0 - \alpha\bar{v}t)^2 \tag{3}$$

ここで、 ρ :汚染物質密度[M/L³]、 n :単位長さ当たりに存在する汚染物質単一粒子数、 r_0 :汚染物質単一粒子の初期状態における半径[L]。式(3)を DNAPL 境界における濃度として式(1)の計算を行った。計算時の諸条件については表 1 に示す。この計算では、先の 1 次元カラム実験結果と結果を比較・検証するために、水位変動などは同じ条件を与えた。図 5 に計算結果を縦軸は y/A 、横軸は t/T で実験結果と同様に与えて示す。色が黒い部分ほど高濃度であることを示している。この結果から DNAPL の滞留位置付近では、高濃度の分布が見られ、地下水位変動の影響を受けて濃度分布が移動していることがわかる。これは 1 次元カラム実験結果ともよく似た傾向を再現している(図 6)。

4. まとめ

以上の結果より、飽和帯中に滞留している DNAPL が地下水中へ溶解するとき、地下水位変動の影響を受けていることが明らかになった。さらに、その現象を考慮した溶解モデルを用いて数値計算を行うことにより、地下水位変動を伴う飽和帯中における DNAPL 溶質輸送をほぼ妥当に再現できた。

5. 参考文献 1)村岡浩爾(1991):有機塩素化合物の水への溶解,生産と技術, Vol.43Vol.43,No.1,pp.49~52

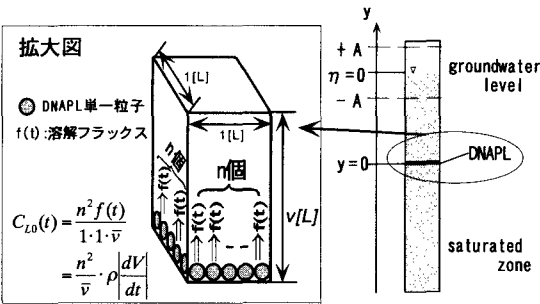


図 4：汚染源境界濃度の概念図

表 1：計算条件

A(振幅): 10(cm)	θ (間隙率): 0.4
T(周期): 6(hours)	τ (屈曲度): 0.66
$\bar{v}$ (y方向Darcy流速): 4.63×10^{-4} (cm/sec)	D^*_L (分子拡散係数): 1.515×10^{-5} (cm ² /sec)
α (無次元溶解定数): 2.38×10^{-4}	r_0 (汚染物質単球形の半径): 0.1(cm)
ρ (汚染物質密度): 1.47(g/cm ³)	α_L (縦方向分散能): 2.21×10^{-2} (cm)

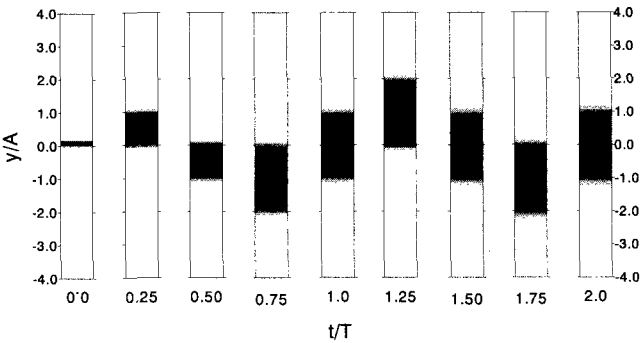


図 5：計算結果

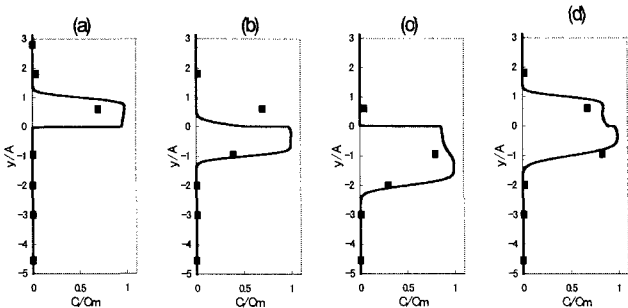


図 6：計算結果と実験結果の比較
(実線：計算結果、点：実験結果)