

VII-19

地下水位変動場における飽和帯中 DNAPL の溶解と 2 次元輸送について

関西電力(株) 正会員 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。DNAPL は飽和帯中に滞留すると、地下水流れの影響を受けずにそのままの位置に滞留し続けるが、地下水中への溶解現象については、地下水流れの影響を受ける。特に地下水位変動の影響も大きいと考えられる。そこで本研究では、地下水流れの影響を考慮した DNAPL 溶解現象をモデル化し、そのモデルを用いて 2 次元場における DNAPL 溶質輸送を数値計算により再現して考察した。

2. DNAPL 溶解現象

図 1 のように DNAPL が飽和多孔体中に滞留している状態を 2 次元 (x, y 方向) で考える。地下水流速が任意の方向にダルシー流速 q で、水平 x 方向には $\bar{u}$ 、鉛直 y 方向には地下水位変動に伴う流れ $\bar{v}$ という成分を持つとする。DNAPL が単球形 (半径: $r(t)$) で 1 個存在するとし (図 1 拡大図)、不動であると仮定する。

この条件下で一様な流れ q の中に滞

留している単球形 DNAPL (表面積 S , 体積 V) の溶解について、無次元溶解定数: α を用いた次式を与える。

$$dV/dt = -\alpha q S \quad (1)$$

図 1 に示すような概念から (1) 式を用いて DNAPL 境界での汚染濃度 $C_{L0}(t)$ [M/L³] を次式で与える。

$$C_{L0}(t) = \frac{C_m - C'_L}{C_m} \cdot \frac{4\pi\rho\alpha q(r_0 - \alpha q t)^2}{\bar{u} \cdot \bar{v}} \quad (2)$$

ここで、 ρ : 汚染物質密度 [M/L³]、 r_0 : DNAPL 単一粒子の初期状態における半径 [L]、 C_m : DNAPL の水への溶解飽和濃度、 C'_L : 地下水流 q の汚染濃度 [M/L³] である。(2) 式の二重下線の部分は、地下水位変動が振動流であるために、DNAPL に向かって流れてくる地下水流 σ が濃度を持っていることで、DNAPL の溶解が起こりにくくなる現象を考慮するためのものである。

3. 2 次元 DNAPL 溶質輸送方程式

2 次元場における DNAPL 溶質の輸送は次式のような移流拡散方程式で表される。

$$\theta \frac{\partial C_L}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial C_L}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial C_L}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \theta D_{Lxx} \frac{\partial C_L}{\partial x} + \theta D_{Lxy} \frac{\partial C_L}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \theta D_{Lyx} \frac{\partial C_L}{\partial x} + \theta D_{Lyy} \frac{\partial C_L}{\partial y} \right\} \quad (3)$$

ここで、 C_L : 飽和帯中の汚染濃度 [M/L³]、 θ : 間隙率、 τ : 屈曲度、 D_{Lxx} , D_{Lxy} , D_{Lyx} , D_{Lyy} : 飽和帯中の見かけの分散係数 [L²/T] である。分散係数については、Huyakorn ら¹⁾の定義に従って流速依存型の式を与えた。汚染源境界では式

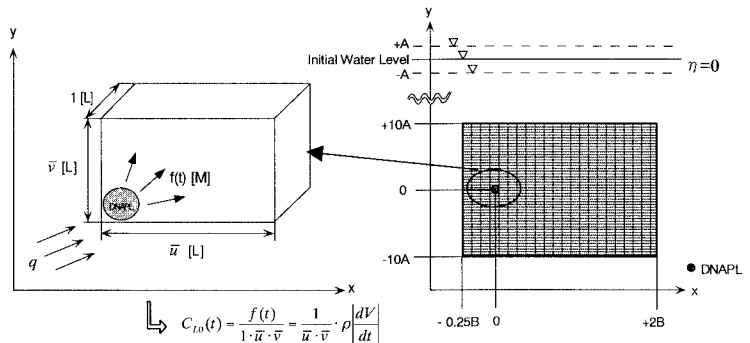


図 1: 2 次元場における DNAPL 溶解概念図

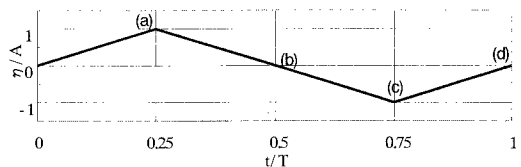


図 2: 水位変動

keywords: 地下水汚染, DNAPL, 地下水位変動, 溶解現象, 2 次元溶質輸送

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 大阪大学土木工学科 Tel: 06-879-7605 Fax: 06-879-7607

(2)を用いて計算を行い、DNAPL 溶質輸送分布の経時変化を求めた。

4. 計算条件

計算領域については図1に示すような領域($-0.25B \leq x \leq +2B$ ($B=\bar{u} \times T$), $-10A \leq y \leq +10A$)とした。今回の計算では、表1に示すような諸定数を用いて計算を行った。また、計算条件として図2に示す水位変動(周期 T ; 振幅 A)を仮定し、鉛直 y 方向のダルシー流速 $\bar{v}=4A/T$ とした。ここでは表2の case1, case2 のような計算ケースを設定し、計算を行った。

5. 数値計算結果

数値計算結果を図3,4に示す。case1(図3)は鉛直方向の地下水位変動に伴う流れが、水平方向の流れよりも小さく、DNAPL 溶質の輸送も水平方向への分布が卓越している。しかし case2(図4)では鉛直方向の流れと水平方向の流れは等しいため、DNAPL 溶質は鉛直方向にも大きく輸送され、鉛直方向に濃度分布が大きく蛇行している。こ

表1：計算時の諸定数

θ (間隙率) : 0.4	τ (屈曲度) : 0.66
d (土壌粒子の粒径) : 0.1 (cm)	D_L^* (分子拡散係数) : 1.515×10^{-5} (cm ² /sec)
ρ (DNAPL密度) : 1.47 (g/cm ³)	r_0 (DNAPL単一球形の粒径) : 0.1 (cm)
α_T (横方向分散能) : 1.6×10^{-3} (cm)	α_L (縦方向分散能) : 2.21×10^{-2} (cm)

表2：計算条件

	$\bar{u}$ (x 方向流速)	A (振幅)	T (周期)	$\bar{v}$ (y 方向流速)
case1	1 m/day	2.5 cm	1 day	0.1 m/day
case2	1 m/day	25 cm	1 day	1 m/day

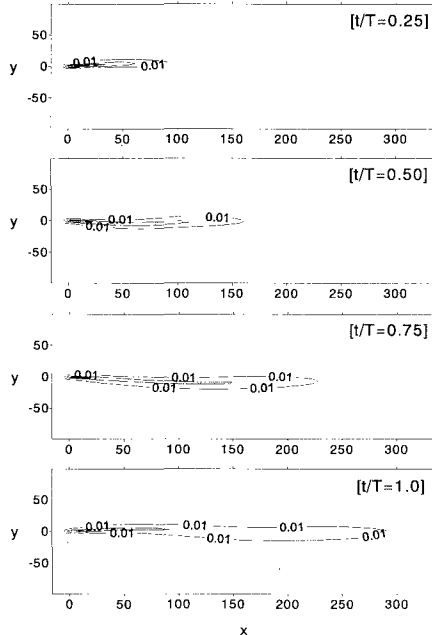


図3：計算結果 case1

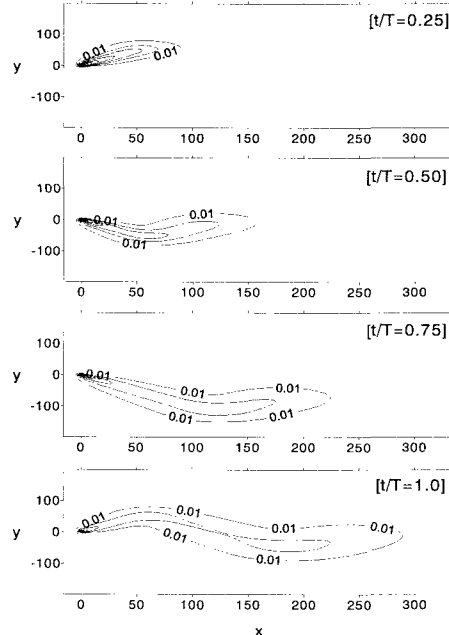


図4：計算結果 case2

のように地下水位変動に伴う鉛直方向の流れが大きい場合は、その影響から DNAPL の溶解も進むために、濃度分布の拡がりが大きくなることが再現できた。

6. まとめ

DNAPL の溶解現象には地下水流が影響を及ぼしている。特に鉛直方向の地下水位変動の影響も無視できないものであることが数値計算により明らかになった。すなわち2次元場における DNAPL 溶質輸送を再現するには、地下水流の影響（地下水位変動の影響）を考慮した DNAPL 溶解現象モデルを用いることが必要である。

7. 参考文献

1) Huyakorn, P. S., and Prinder, G. F. : Computational Methods in Subsurface Flow, Academic, San Diego, Calif., 1983