

数値解析による DNAPL の溶解現象が地下水長期汚染に及ぼす影響評価

熊本大学 工学部 学生会員 ○永井 千彩希 熊本大学大学院 正会員 椋木 俊文
熊本大学特別研究員 非会員 Tinet Anne-Julie

1. はじめに

トリクロロエチレン(以下、TCE)のような高密度難水溶性流体は、揮発性有機化合物の一種であり、一般に DNAPL(Dense-Non-Aqueous-Phase-Liquid)と呼ばれる¹⁾。地盤中において DNAPL は地下水に少しずつ溶解することで長期にわたって地下水汚染を引き起こす²⁾。効率的な DNAPL の浄化を行うには飽和帯でどのように浸透し、溶解するかを DNAPL で汚染された 2 次元断面帯水層を仮定し、U.S.EPA が多相流浸透—移流分散方程式を 2 次元差分法でコード化したオープンソースコードの NAPL Simulator を使用して、本報では TCE の物性を用いた地下水層中の物質移動を評価したので報告する。

2. 分散長と溶解速度定数の感度解析³⁾

解析断面を図 1 に示す。横幅 50m、高さ 25m を想定しておりメッシュサイズは横、縦共に 1m としている。解析断面の下部 1m には難透水層があり、帯水層はその上部 24m である。地下水は左から右へと流れており、解析断面左隅に圧力水頭 $h_w=1.25\text{m}$ を固定水頭として与え、動水勾配を 2.5% にしている。DNAPL 注入点より右に 3m ずれた断面を観測断面 A、下に 3m ずれた断面を観測断面 B としている。解析に使用した地盤のパラメーターを表 1 に示す。今回は DNAPL として TCE を想定して、流体密度 $\rho_N=1.5\text{g/cm}^3$ 、粘性係数 $\mu_N=0.5\times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、TCE と水との界面張力 $\sigma_{NW}=34.5\times 10^{-3}\text{N/m}$ としている。解析手順は 2 つに分けられ、ステップ 1 では 3 日間 TCE を断面の上面中央から固定水頭 $h_N=0.7\text{m}$ で注入する(DNAPL の飽和地盤中への浸透プロセス)。ステップ 2 では TCE 注入を止めて、1 年間の移流分散解析をおこなう。溶解速度定数とは地下水の pH や温度等に大きく依存する値であり、決定することが難しいことから、今回の解析では基準の値を文献から $1.75\times 10^{-3}/\text{s}$ とした。また、溶解速度による変化による濃度分布の違いを評価する為に、溶解速度定数が $1.75\times 10^{-4}/\text{s}$ と $1.75\times 10^{-2}/\text{s}$ の場合の解析を行った。

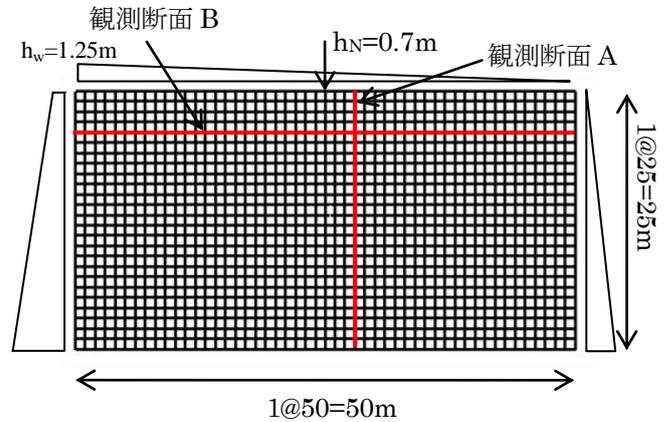


図 1. 解析断面のメッシュ図

表 1. 解析の条件

| Parameter | | Toyoura sand | Aquitard |
|---|-----------------|--------------|----------|
| Intrinsic permeability, K | cm^2 | 1.48E-07 | 1.02E-11 |
| Porosity, Φ | - | 0.38 | 0.6 |
| Soil bulk density, ρ_d | g/cm^3 | 1.63 | 1.02 |
| Residual water saturation, S_{wr} | - | 0.14 | 0.15 |
| Residual TCE saturation, S_{nr} | - | 0.49 | 0.2 |
| VG: drainage α for air-water, α | 1/cm | 0.0212 | 0.0001 |
| VG: imbibition α for air-water, α | 1/cm | 0.424 | 0.0002 |
| VG parameter for soil, n | - | 6.57 | 3 |
| VG parameter for water, ζ_w | - | 0.5 | 0.5 |
| VG parameter for TCE, ζ_n | - | 0.333 | 0.333 |

このときの分散長は縦(地下水の流れ方向)分散長、横(地下水の流れに対して垂直の方向)分散長をそれぞれ 10cm、1cm とした。

一方、分散長は限地盤の解析結果に影響を及ぼすことが考えられているが、その値の決定は容易ではない。今回使用している地盤は豊浦砂であることから、文献値より基準値を縦分散長、分散長それぞれ、10cm、1cm としている。ここでは分散長がどれ程影響を及ぼすかを調べる為に、縦分散長、横分散長をそれぞれ 50cm、5cm と 100cm、10cm の場合でも解析を実施した。ただし、このときの溶解速度定数は $1.75\times 10^{-3}/\text{s}$ とした。

3. 解析結果

3.1 溶解速度定数の解析結果

図 2(a) $1.75\times 10^{-2}/\text{s}$ 、(b) $1.75\times 10^{-3}/\text{s}$ 、(c) $1.75\times 10^{-4}/\text{s}$ は、1 年後における TCE 濃度分布を示している。図 2(c)は、他の図(a) (b)と比較して、溶解速度定数が小さいため、間隙水への溶解が遅いことから濃度分布がほとんど観

察できない。また、それぞれのケースにおける最大 TCE 濃度は(d)で 0.4075mg/l、(e)で 0.0416mg/l、(f)で 0.0042mg/l であることから 1 オーダー溶解速度定数を変化させると TCE 濃度も 1 オーダー程変化していることがわかった。次に地下水質環境基準値 0.03mg/l 以上の範囲を調べるため、0.003mg/l 以上の汚染された面積を調べると、(d)で約 235m²(e)で約 45m²(f)で 0m²となり、(d)は(e)の約 5.2 倍もの範囲を汚染しているといえる。溶解速度定数は、温度依存性のパラメーターであることから、地熱開発地域や温泉街などにおける地下環境の温度が高い地域における TCE 汚染は被害を拡大する可能性があると考えられる。

3.2 分散長の解析の結果

図 3 は、縦分散長、横分散長を 10cm、1cm をそれぞれ(d) 50cm、5cm を(e)100cm、10cm(f)に変化させた場合の濃度分布の変化を示している。図 3 より、最も分散長の大きな(f)は汚染範囲が広く、分散長の小さな(d)が狭く見られる。次に、鉛直方向と水平方向への分散長の影響を調べるために、図 1 に示す観測断面 A と B における 1 年後の TCE 濃度分布を図 4.1 と図 4.2 に示す。TCE 濃度の地下水質環境基準値 0.03mg/l 以上の範囲は調べると、図 4.1 では鉛直方向への影響はどれも 3.5m~4m であり、大きな違いは観察できない。また、それぞれの最大 TCE 濃度は(d)0.413mg/l、(e)0.3815mg/l、(f)0.3675mg/l となり、(a)が最も大きいことがわかった。しかし、図 4.2 に示す基準値の線との交点でとなる節点番号 128 から水平方向の濃度分布を比較すると、(d)が 17.5m、(e)が 13.5m、(f)が 10m となり、(f)分散長 100cm の場合より(d)分散長 10cm の方が 7.5m分、水平方向への汚染領域が広い結果となっている。

4. まとめ

溶解速度定数も分散長も帯水層における DNAPL の溶解挙動に大きく影響し、特に溶解速度定数においては、1 オーダー変化すると濃度も 1 オーダー変化し、汚染範囲は約 5 倍以上広がってしまうということがわかった。そして、今回は 1 年の解析でこれだけ差がでたが、実際の地下水汚染のように長期に問題が及ぶと、より大きな差がでてしまうということとなる。今後は実際の TCE による地盤、地下水汚染事例を用いて解析を行っていく予定である。

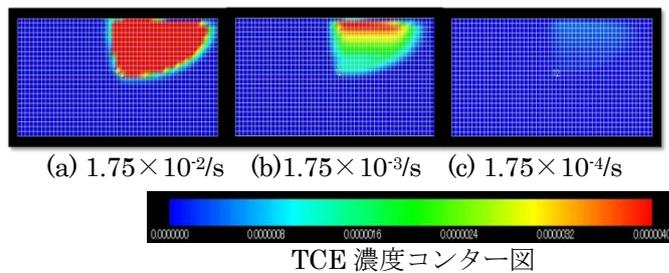


図 2. 溶解速度定数の解析結果

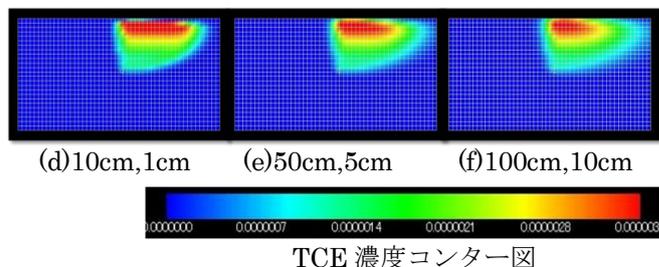


図 3. 分散長の解析結果

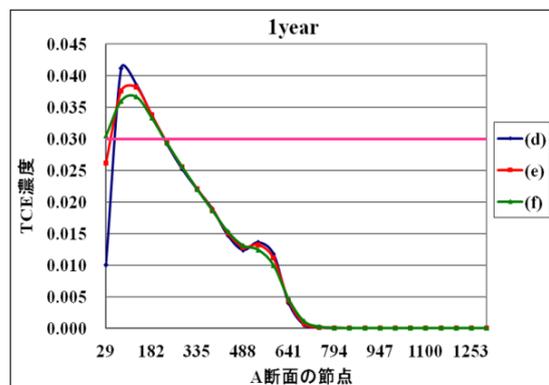


図 4.1 観測断面 A における 1 年後の TCE 濃度分布

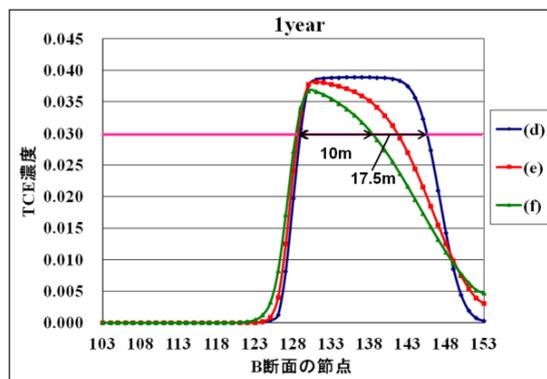


図 4.2 観測断面 B における 1 年後の TCE 濃度分布

参考文献

- 1) 遠藤和人: DNAPL 汚染サイトの原液移動特性と汚染分布評価、京都大学地球環境学大学院平成 14 年度博士学位論文 pp112、pp183-198、2002
- 2) 藤縄克之: 環境地下水学、共立出版 pp210-254、2010
- 3) 三上和昭: 通気帯における LNAPL 原液浸透挙動の数値解析、熊本大学工学部環境システム工学科平成 21 年度卒業論文、2010