

第Ⅱ部門

粘土層から帯水層への塩素化エチレン類の再溶出の評価

和歌山大学大学院システム工学研究科
和歌山大学システム工学部
和歌山大学システム工学部

学生員 ○田中 恒成
正会員 江種 伸之
正会員 田内 裕人

1. はじめに

揮発性有機化合物に汚染された粘土層などの難透水層を浄化する技術に電気発熱法¹⁾がある。これは、粘土層に吸着した汚染物質を加温により粘土層上部の帯水層中に溶出させ、原位置浄化技術、例えば原位置バイオレメディエーションなどで無害化させる技術である。しかし、電気発熱法によって粘土層が浄化された後、浄化されていない粘土層に汚染物質が残っている場合に、浄化された粘土層の下端（汚染物質が残っている粘土層の上端）から汚染物質が移流分散によって輸送され帯水層が再汚染されることがある。本研究では、数値解析により帯水層の再汚染を生じさせないためには粘土層をどの程度浄化させればよいかを評価した。

2. 方法

対象物質はテトラクロロエチレン(PCE)、トリクロロエチレン(TCE)、ジクロロエチレン(DCEs)、クロロエチレン(CE)の塩素化エチレン類で、粘土層および帯水層における PCE から CE までの還元的脱塩素過程を考慮する。汚染原因物質（親物質）には PCE を設定した。本研究では、断面二次元領域を対象に還元的脱塩素化を伴った塩素化エチレン類の移流分散解析を行い、粘土層から帯水層への塩素化エチレン類の再溶出過程を数値解析によって評価した。解析の対象となる浄化された粘土層の厚さは 0.1m から 2.0m までの 0.1m 刻みで設定した。浄化された粘土層下端の PCE 濃度は 0.1mg/L および 1mg/L の 2 パターンとした。図 1 に解析領域を示す。

以下に解析に用いた移流拡散方程式を示す。

$$n_e \frac{\partial c_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(n_e D_x \frac{\partial c_1}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(n_e D_z \frac{\partial c_1}{\partial z} \right) - n_e v_x \frac{\partial c_1}{\partial x} - n_e \lambda_1 c_1 \quad (1)$$

$$n_e \frac{\partial c_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(n_e D_x \frac{\partial c_2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(n_e D_z \frac{\partial c_2}{\partial z} \right) - n_e v_x \frac{\partial c_2}{\partial x} + Y_{2/1} n_e \lambda_1 c_1 - n_e \lambda_2 c_2 \quad (2)$$

$$n_e \frac{\partial c_3}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(n_e D_x \frac{\partial c_3}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(n_e D_z \frac{\partial c_3}{\partial z} \right) - n_e v_x \frac{\partial c_3}{\partial x} + Y_{3/2} n_e \lambda_2 c_2 - n_e \lambda_3 c_3 \quad (3)$$

$$n_e \frac{\partial c_4}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(n_e D_x \frac{\partial c_4}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(n_e D_z \frac{\partial c_4}{\partial z} \right) - n_e v_x \frac{\partial c_4}{\partial x} + Y_{4/3} n_e \lambda_3 c_3 - n_e \lambda_4 c_4 \quad (4)$$

ここに、下付き数字 1 は汚染物質（親物質，PCE），2 は 1 の分解による分解生成物質（子物質，TCE），3 は 2 の分解による分解生成物質（孫物質，DCEs），4 は 3 の分解による分解生成物質（ひ孫物質，CE）を表す。その他の記号の意味は以下の通りである。 n_e ：有効間隙率， c ：汚染物質濃度， D_x ：流れ方向(x 方向)の分散係数， D_z ：鉛直方向(z 方向)の分散係数， v_x ：帯水層の実流速， λ ：一次反応速度定数， Y ：分子量比（例えば， $Y_{2/1}$ の場合は物質 1 の分子量比の物質 2 の分子量）である。

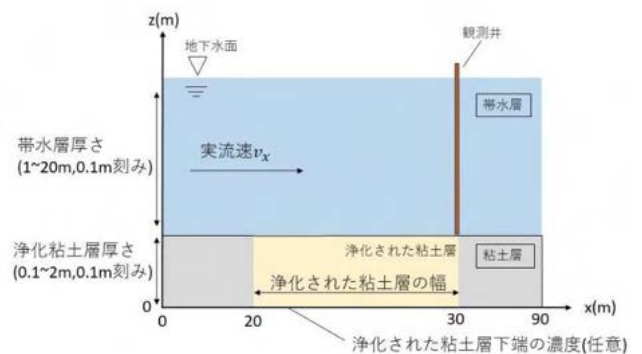


図1 解析領域

3. 結果と考察

表 1 に帯水層の厚さを 5.0m、浄化された粘土層幅を 10m、汚染源濃度を 1.0mg/L、帯水層の地下水実流速を 0.1m/day とした場合の PCE および TCE の観測

井戸における定常状態の平均濃度を示す。PCE および TCE の地下水環境基準は 0.01mg/L 以下である。表 2 に同条件下での DCEs と CE の濃度変化を示す。DCEs の地下水環境基準は 0.04mg/L 以下、CE の地下水環境基準は 0.002mg/L 以下である。

表 1 観測井の PCE と TCE の定常濃度

5m	0.01以下	0.01以下
浄化粘土層厚(m)	PCE濃度(mg/L)	TCE濃度(mg/L)
0.1	0.03634	0.03720
0.2	0.02225	0.02816
0.3	0.01321	0.01956
0.4	0.00776	0.01313
0.5	0.00454	0.00864

表 2 観測井の DCEs と CE の定常濃度

浄化粘土層厚(m)	DCEs濃度(mg/L)	CE濃度(mg/L)
0.6	0.00646	0.00506
0.7	0.00452	0.00380
0.8	0.00311	0.00280
0.9	0.00212	0.00203
1	0.00142	0.00145

表の着色部分は環境基準を満たしていない粘土層の厚さと各物質の観測井における平均濃度を示している。この条件では粘土層を 0.5m まで浄化することで、観測井戸内の PCE と TCE の平均濃度が環境基準を超えないことがわかる。ただし、CE は粘土層を 1.0m まで浄化しなければ環境基準を下回らない。よって、この条件では粘土層を 1.0m まで浄化すれば、4 物質全ての濃度が環境基準を満たし、再汚染を生じさせないことになる。帯水層の厚さや地下水実流速などの値が変われば、浄化すべき粘土層の厚さも変わる。例えば、地下水実流速が 0.01m/day で、他の条件が同じ場合には、粘土層を 0.3m 浄化すれば、観測井における 4 物質全ての濃度が環境基準を下回る。結果として、全ての物質が環境基準を満たすには、CE が環境基準を満たすまで粘土層を浄化する必要がある。これは CE の環境基準が他の物質に比べて 1 オーダー小さいためである。

表 3 に地下水実流速を 0.01m/day および 0.1m/day とした場合の帯水層と粘土層の境界部の定常濃度を示す。なお、実流速 0.1m/day の場合は、前述した

ように粘土層を 1.0m 浄化しており、実流速が 0.01m/day の場合には、粘土層を 0.3m 浄化している。

表 3 粘土層と帯水層の境界部の定常濃度

	PCE(mg/L)	TCE(mg/L)	DCE(mg/L)	CE(mg/L)
実流速0.01m/day	0.000523	0.001616	0.002644	0.002847
実流速0.1m/day	0.000359	0.001027	0.001547	0.001535

実流速が小さい場合、CE は粘土層を移動する間にその濃度が環境基準を満たすまで脱塩素化されないが、帯水層を移動する時間が長いために、下流に移動する間に脱塩素化が進み、観測井では環境基準を下回る。一方、実流速が大きい場合には、CE が帯水層を移動する時間が短いために、帯水層中では十分な脱塩素化が行われない。このため、粘土層を移動する間に環境基準を満たしておく必要がある。

4. おわりに

本研究では、電気発熱法を用いた粘土層の浄化後に残留する汚染物質が帯水層に移行しても帯水層が再汚染されない条件を数値解析により検討した。具体的には、浄化する粘土層の厚さを求めた。数値解析の結果、帯水層の厚さが同じ場合には、地下水実流速が小さいほど浄化すべき粘土層の厚さが薄くなることがわかった。また、本研究では、地下水実流速が大きい場合には、粘土層内で全ての物質の濃度が環境基準以下になっていないといけませんが、地下水実流速が小さい場合には、帯水層中での脱塩素化による濃度低下が期待できるので、粘土層上端の CE 濃度が環境基準を超えていても観測井における濃度が環境基準を下回ることもあり得ることがわかった。

5. 参考文献

- 1) ○福田恭平・湯浅善仁・井上藤男・大田 昌昭・三重野俊彦・長曾哲夫:電気発熱法における土壌加温シミュレーション, 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会 講演集, Vol20, pp.296-300, 2014.