

## II-73 ガス拡散を考慮した有機塩素化合物の自然河床区間から地下水系への浸透特性について

九州大学工学部 学生員 ○江種 伸之  
九州大学工学部 正 員 神野 健二  
通産省工業技術院 鷺見 栄一

### 1. はじめに

トリクロロエチレン（TCE）やテトラクロロエチレン（PCE）といった有機塩素化合物（CHC）による地下水汚染には、水に溶解した状態のものが地下水系へ侵入して引き起こす場合と、原液状態のものが地下水系に侵入して引き起こす場合とが考えられる。今回対象となった地域では、事業所からの排水中に含まれているTCEが自然河床区間から地下水系へ侵入していることから、溶解した状態のCHCの地下水系での挙動が問題となる。通常、事業所から排出されるCHCの濃度は低いため地下水が高濃度で汚染されることは少ない。しかし、CHCを使用しているハイテク工場が地方の内陸型工場団地に分散しつつある現状から、排水由来の地下水汚染が低濃度ではあるが全国的に広がっている可能性が考えられる。そこで著者らは、これまで地下水面の変動といった水理学的な要因によるTCEの地下水系への侵入の違いを数値解析によって検討したり<sup>1)</sup>、CHCの揮発性を考慮して地下水面から揮発したPCEガスの不飽和土壤中での輸送特性を鉛直1次元のカラム実験と数値解析との比較により検討してきた<sup>2)</sup>。そこで今回は、TCEが自然河床区間から地下水系へ侵入していく様子を、TCEの揮発性も考慮して数値解析を行い検討した。

### 2. 数値解析モデル

通常、土中水に溶解しているCHCはトレーサの挙動と同じように取り扱える。今回は断面2次元不飽和一飽和領域で解析するため、水平方向にx軸、鉛直上向きにy軸をとり、水分移動の基礎式、液相および気相中のCHCの輸送に関する基礎式は次式で示される。

#### 不飽和一飽和領域における水分移動の基礎式

$$(C_w + \alpha S) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_L k_{rL} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_L k_{rL} \left( \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\rho}{\rho_L} \right) \right] \quad (1)$$

#### 液相中のCHC輸送に関する基礎式

$$\begin{aligned} R_L \frac{\partial (\theta C_L)}{\partial t} + u_L' \frac{\partial (\theta C_L)}{\partial x} + v_L' \frac{\partial (\theta C_L)}{\partial y} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \theta D_{Lxx} \frac{\partial C_L}{\partial x} + \theta D_{Lxy} \frac{\partial C_L}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \theta D_{Lyx} \frac{\partial C_L}{\partial x} + \theta D_{Lyy} \frac{\partial C_L}{\partial y} \right] \\ + \alpha \lambda_H (C_g - H \cdot C_L) \end{aligned} \quad (2)$$

#### 気相中のCHC輸送に関する基礎式

$$R_g \frac{\partial (a C_g)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ a D_{g*} \frac{\partial C_g}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ a D_{g*} \frac{\partial C_g}{\partial y} \right] + \alpha \lambda_H (H \cdot C_L - C_g) \quad (3)$$

ここに、 $C_w$  : 比水分容量、 $S$  : 比貯留係数、 $\alpha$  : 飽和帯では1、不飽和帯では0を表すパラメーターである。 $h$  : 圧力水頭、 $\rho_L$  : 純水の密度、 $\rho$  : 土壌水の密度であり、今回は河川水中CHCの濃度が非常に低いため、土壌水への密度効果は大きくないとして $\rho = \rho_L$ とした。 $K_L$  : 飽和透水系数、 $k_{rL}$  : 相対透水系数、 $\theta$  : 土壌水分率、 $a$  : 気相率、 $C_L$  : 液相中CHC濃度、 $C_g$  : 気相中CHCガス濃度、 $u_L'$ ,  $v_L'$  : x, y方向の土壌水の実流速、 $R_L, R_g$  : 液相および気相中CHCの土壌中有機炭素への吸着による遅れ係数、 $H$  : 無次元のヘンリー定数、 $\lambda_H$  : ガス発生速度、 $D_{Lxx}, D_{Lxy}, D_{Lyx}, D_{Lyy}$  : 液相での分散係数、 $D_{g*}$  : 気相での分子拡散係数である。各基礎式についての説明は文献2)を参照されたい。

### 3. 解析領域と解析結果

図-1には、本研究で対象とした水路周辺の縦断面図の概略を示している。この水路は大部分がコンクリートで被覆されているが、一部分だけ自然河床区間があり、その区間からのTCEの浸透が考えられる。帯水層は2層に分かれ、上層は層厚が0.4~0.5mと薄く、細砂を主体とした砂質土層である。下層は直径150~300mmの玉石が多量に混入する砂レキ層である。今回の計算での地下水面は $H_1=7.6$ m、 $H_r=5.95$ mとしている。土壌の不飽和特性などの計算条件については、文献1)を参照されたい。

図-2には、液相および気相中TCEの等濃度線を示している。今回のように溶解した状態のTCEが自然河床区間から地下水系へ侵入していくような場合には、液相中TCEの広がり方がTCEガスの広がりよりも卓越することになる。これは、液相から気相へのTCEガスの発生が抑えられて、拡散によるTCEガスの輸送量が少ないのに対し、土中水の移流による液相中TCEの輸送が大きいことが原因と考えられる。このことは、TCEガス濃度が地下水面近傍で一番高く、上方に行くに従って減少していること、および図-3のB-4孔付近の不飽和帯中では常に液相からの揮発が生じていることから理解できる。

図-4には、観測孔B-2付近でTCEの揮発を考慮する場合としない場合についての液相中TCE濃度の鉛直分布を示している。

砂レキ層中では揮発を考慮する場合の濃度がしない場合の濃度よりも約1%程低くなっている。一方、砂層中では揮発を考慮する場合の濃度がしない場合の濃度よりも高くなっている。これは、砂レキ層中では土中水の流速が大きいため、液相中のTCEの輸送がTCEガスの輸送よりも卓越しているが、砂層中では土中水の流速がほとんど存在しないために、ガス拡散による輸送の方が液相中のTCEの輸送よりも卓越していることが原因と考えられる。

#### 参考文献

- 1) 江種伸之ら：トリクロロエチレンの自然河床区間から地下水系への浸透特性について、水工学論文集第36巻、pp.391-396、1992
- 2) 江種伸之ら：揮発を考慮した有機塩素化合物の不飽和土壌中での輸送特性について、地下水汚染とその防止対策に関する研究集会 第2回講演集、pp.30-35、1992

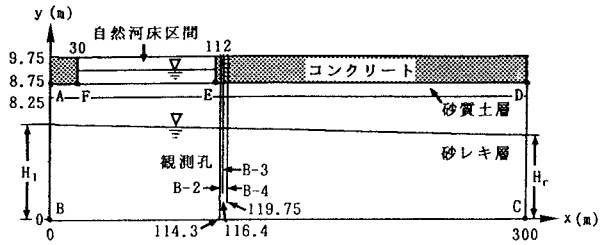


図-1 解析領域概略図

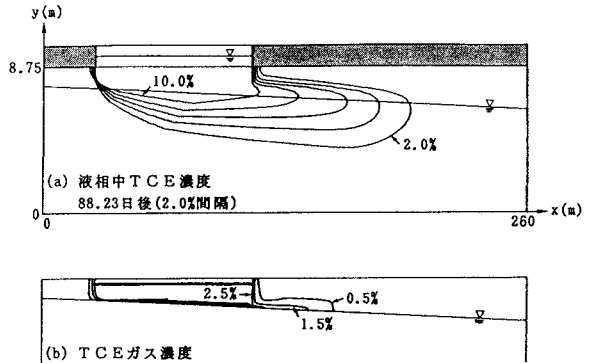


図-2 液相および気相中TCEの等濃度線

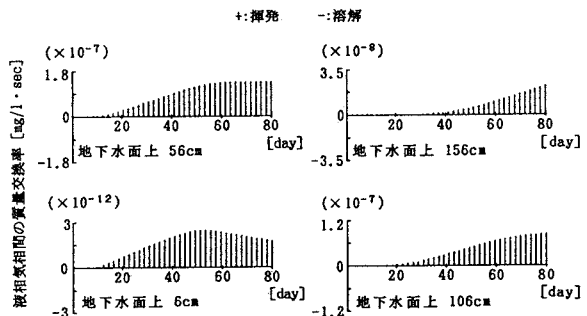


図-3 液相気相間の質量交換率

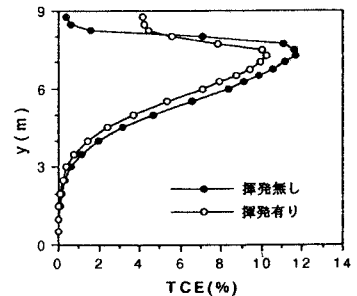


図-4 B-4孔付近の液相中TCEの鉛直濃度分布