

揮発を考慮した不飽和土壌中でのテトラクロロエチレンの輸送特性について

九州大学工学部 学生員 ○上関 勝之
 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
 福岡市衛生試験所 江崎 光洋

1. はじめに

近年、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、1,1,1-トリクロロエタンなどの有機塩素化合物による地下水汚染が、非常に大きな社会問題となっている。本研究で対象としたクリーニング工場周辺地域においてもテトラクロロエチレン (PCE)による地下水汚染がかなり下流域にまで広がっている。しかも、テトラクロロエチレンは揮発性の物質であるため地下水中だけでなくガスの状態で不飽和土壌中にも含まれている。そこで、本研究では揮発を考慮した有機塩素化合物の地下水汚染のメカニズムを把握するために、鉛直 1次元での PCEガスの輸送を室内実験と数値解析により検討する。

2. 室内実験

今回の室内実験は、地下水中に溶けている PCEが水分移動と揮発により不飽和土壌中へ侵入し、移動していくメカニズムを把握することを目的としているため、不飽和土壌中の各深さでの PCEガス濃度を測定した。そのための実験装置は、図-1のような直径10cm、高さ35cmの亚克力製の円筒カラムを使用した。カラムには現地で採取した攪乱土を粒土調整(125 μ m以下は除去)して充填し、カラムの底面から 5.0cmのところまで水を満たしてここを地下水面とした。ガス濃度は地下水面より上方2.5cm (No.1), 7.5cm (No.2), 12.5cm (No.3), 17.5cm (No.4), 22.5cm (No.5), 27.5cm (No.6)の 6カ所で土中ガスをガスシリンジにより採取し、ガスクロマトグラフを使って測定した。その他に、土中ガスを採取した同じ高さに温度センサーを設置し、土中温度を測定した。同時に、室内温度と湿度を測定し、地表面からの蒸発量をカラム全体の重量変化を電子天秤で測定することで求めた。なお、カラム上方には蒸発を促進させるために白熱電球を当てた。今回の実験で用いた人工汚染地下水中の PCE濃度は現地での濃度とほぼ同じ 43.5mg/lとした。図-2には実験開始から 10時間後までの気温、蒸発量と土中温度の実測値を示している。また、図-3の印は各測定点でのPCE ガス濃度の実測値であるが、使用した土壌に未揮発の PCEが吸着されていたため、NO.1、NO.2の2点以外では有意なガス濃度の上昇は認められなかったもので示していない。

3. 数値解析

ここでは、PCE が地下水面から不飽和土壌中へ移動する過程を数値計算によって検討する。鉛直上向きに y 軸をとり、不飽和土壌中における水の流れの基礎式は (1)式で与えた。また、PCE の輸送に関する基礎式は、今回は不飽和土壌中での混合気体の圧力がどの深さでも大気圧に等しい全圧をもつと考えて、気相での移流項は考えずに次の (2), (3)式で与えた。

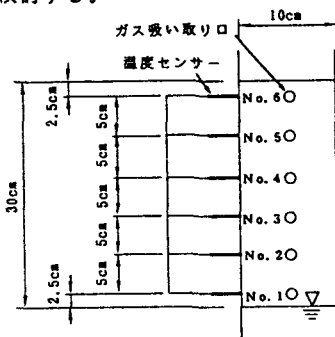


図-1 実験装置の概略図

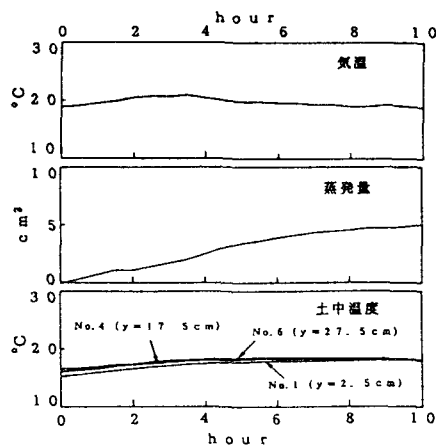


図-2 気温・蒸発量・土中温度の実測値

1) 不飽和土壌中における水の流れの基礎式

$$C_w(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left\{ k(h) \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\rho}{\rho_f} \right) \right\} \quad (1)$$

2) 液相におけるテトラクロロエチレンの移流・分散方程式

$$\frac{\partial (\theta C_L)}{\partial t} + \frac{V'}{R_d} \frac{\partial (\theta C_L)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\theta D_L}{R_d} \frac{\partial C_L}{\partial y} \right) + a \lambda_H (C_g - H \cdot C_L) \quad (2)$$

3) 気相におけるテトラクロロエチレンの分散方程式

$$\frac{\partial (a C_g)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{a D_g}{R_d} \frac{\partial C_g}{\partial y} \right\} + a \lambda_H (H \cdot C_L - C_g) \quad (3)$$

ここで、 $C_w(h)$:比水分容量、 h :圧力水頭、 t :時間、 $k(h)$:透水係数、 ρ :土中水の密度、 ρ_f :純水の密度(今回はPCEの土中水への密度効果は大きくないので、 $\rho = \rho_f$ とした)、 θ :体積含水率、 a :気相率、 C_L :PCEの水中濃度、 C_g :PCEのガス濃度、 V' : y 方向のDarcy流速、 V' :実流速、 R_d :遅れ係数(今回はPCEの土壌中の有機炭素への吸着を考えず $R_d=1.0$ とした)、 D_L :液相中のPCEの分散係数($D_L = \alpha_L \cdot V' + D_H$)、 α_L :縦方向分散定数、 D_H :液相での分子拡散係数、 D_g :気相での分子拡散係数、 λ_H :ガス発生速度、 H :Henry定数である。ここで、(2)(3)式の右辺第2項は、PCEの液相、気相間での交換を表す²⁾。

数値計算は、(1)式については陰形式の差分法(直接法)、(2)(3)式については粒子移動法(特性曲線法)によって行った。

また、蒸発量は、図-2から時間と共にほぼ一定の割合で増加していることから、 $Q=1.77 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ として与えた。

4. 結果と考察

図-3には、実測値は印で、計算値は実線で示されている。室内実験でガス濃度の上昇が認められた2点の濃度は $0.1 \mu\text{g/l}$ のオーダーであり、人工汚染地下水の濃度 43.5 mg/l に比べてかなり低くなっている。これは今回のような蒸発量では、水分移動に伴うPCEの輸送はほとんどなく、分子拡散による輸送に支配されているためと考えられる。数値計算の結果はガス発生速度が比較の実測値に近くなる3パターンを与えている。この中でガス発生速度が大きい場合には、液相、気相間での交換が大きくなりPCEガス濃度の上昇が早くなる。逆にガス発生速度小さい場合にはPCEガス濃度の上昇が遅くなる傾向にある。これは、ガス発生速度が土中ガスの濃度の解析にとって重要であることを意味している。

謝辞

本研究を行うにあたり、大変お世話になりました福岡市衛生試験所の広中博見氏、九州大学の石秀人氏に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 中野政詩: 土の物質移動学、東京大学出版会、pp.87-105、1991
- 2) B.E.SLEEP and J.F.SYKES: Modeling the Transport of Volatile Organics in Variably Saturated Media, WATER RESOURCES RESEARCH, VOL.25, NO.1, pp.81-92, JANUARY 1989

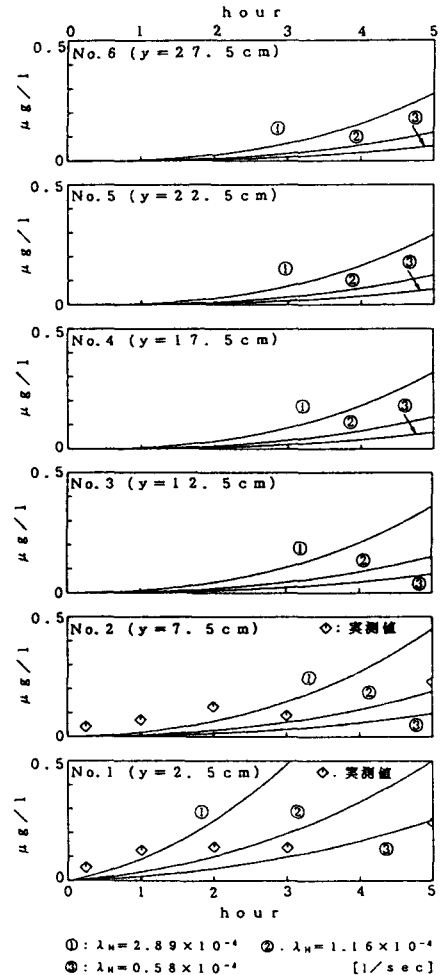


図-3 各測定点でのPCEガス濃度の時間変化