

II-261

揮発性有機塩素化合物の不飽和土壤中での輸送特性について

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
日本工営 正 員 上関 勝之
福岡市衛生試験所 廣中 博見

1. はじめに

トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、1,1,1-トリクロロエタン等の有機塩素化合物による地下水汚染を取り扱う場合には、これらの物質が揮発性であることを考慮する必要がある。実際に地下水汚染の見つかったクリーニング工場周辺ではテトラクロロエチレン(PCE)が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による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、地下水中に溶解している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の把握を目的としているため、不飽和土壌中の各深さ毎に土壌水分中のPCE濃度とPCEガス濃度をそれぞれ測定した。このための実験装置は、図-1のような直径10cm、高さ35cmの円筒カラムをガス濃度の測定用に、直径5cm、高さ35cmの円筒カラムを土壌水分中の濃度の測定用に使用した。カラムには相馬砂を充填し、土壌水分中の濃度とガス濃度は地下水面より上方に2.5cm(No.1), 7.5cm(No.

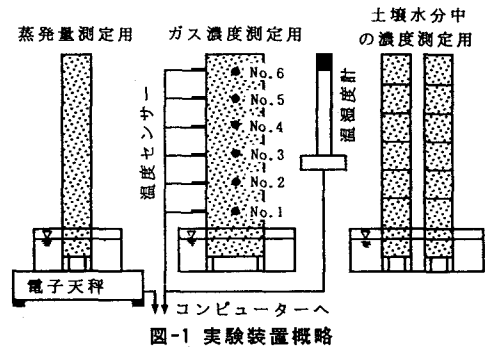


図-1 実験装置概略

.2), 12.5cm(No.3), 17.5cm(No.4), 22.5cm(No.5), 27.5cm(No.6)の6カ所でそれぞれ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。その他には、同じ高さのところ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48.7mg/lとした。

3. 数値解析

ここでは、PCEが地下水面から不飽和土壌中を移動していく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分移動の基礎式は(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¹⁾。

1) 不飽和土壌中における水分移動の基礎式

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

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_f :純水の密度、 ρ :土中水の密度(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 :土壌水分率、 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(今回用いた土壌では有機炭素が検出されなかったため、PCEの吸着はないものとして $R_d=1.0$ とした)、 D_L :液相中のPCEの分散係数($D_L = \alpha_L \cdot v' + D_M$)、 α_L :縦方向分散定数(0.1cm)、 D_M :液相での分子拡散係数($1 \times 10^{-5}\text{cm}^2/\text{sec}$)、 D_g :気相での間隙による屈曲度を考慮した分子拡散係数($0.066\text{cm}^2/\text{sec}$)、 λ_H :ガス発生速度、 H :Henry定数($=1.2$)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。

4. 結果と考察

図-2においては、実測値を*印で、計算値を実線で示している。数値計算をガス発生速度 λ_H が異なる3パターンについて行っているが、計算結果から λ_H が大きくなると土壌水分中のPCE濃度とPCEガス濃度が大きくなる傾向にある。このことから、ガス発生速度 λ_H の決定は数値計算を行う上で重要である。ガス濃度は地下水中の濃度の0.001倍程度と低くなっている。また、土壌水分中の濃度は地下水面近傍では地下水中の濃度とほぼ同じオーダーであるが、土壌水分率が減少しているところから上方のところではガス濃度と同じオーダーまで低くなっている。これは、気相での分子拡散が液相での分子拡散よりかなり大きいことと、水分移動も土壌水分率が減少すると少なくなるために、図-3のように不飽和土壌中を移動していく過程で揮発したPCEガスの輸送が、土壌水中でのPCEの輸送よりも早く上方へ運ばれ、再び土壌水中に溶解するためと考えられる。

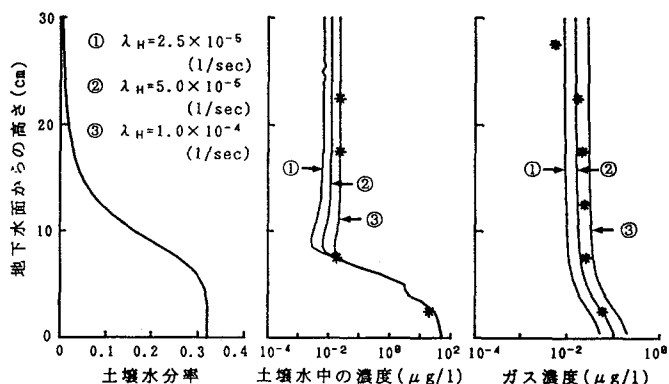


図-2 実測値と計算結果(実験開始25時間後)

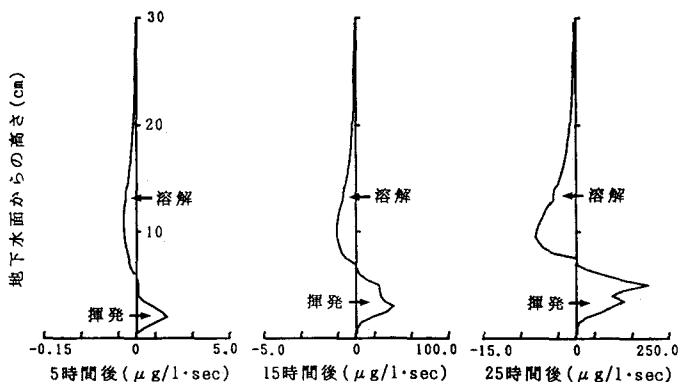


図-3 ある時間における液相-気相間での交換

謝辞

本研究を行うにあたり、大変お世話になりました通産省工業技術院の鷺見栄一氏、福岡市衛生試験所の江崎光洋氏、九州大学の大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