

II-260 多孔体におけるトリクロロエチレンの挙動について

大阪大学大学院 学生員 ○豊口佳之
清水建設（株） 影山 雄
大阪大学工学部 正 員 村岡浩爾

1. はじめに 地下水汚染の原因物質として関心を寄せられている有機塩素化合物は、水に対する溶解度が低く揮発性であるため、当然大気中へと移行する割合は少なくない。そのため、これらの物質の挙動を考える上で、揮散現象は見逃す事のできない重要な要因となる。そこで我々はこれらの物質の中で代表的であるトリクロロエチレンを用いて、地下水に溶解した状態から不飽和土壌圈を経て大気中へと揮散していく過程について基礎実験を行い、その解明を試みた。

2. 実験の概要 内径15cm、高さ60cmのガラス製円筒カラム（図1）により鉛直1次元モデル実験を行った。モデル土壌である1mm粒径のガラスビーズをカラム上端から2.5cmの所まで充填し、土壌表面下50cmの所に地下水面を設定する。土壌圈は完全乾燥状態とし、地下水面はトリクロロエチレン溶液（10.1, 5.4, 2.2mg/lの3ケースについて実験）を満たしている。そして揮散による各深さ（地下水面上1, 10, 20, 30, 40, 50cm）での土壌ガス濃度の経時変化を測定した。このとき地下水濃度も同時に測定できれば理想的だが、濃度測定のための採水が実験状態を大きく変化させる事になるため実験開始時と終了時（192時間後）にのみ測定した。

また、カラム上端には通気孔が設けてあり土壌ガス採取はその通気孔から挿入設置したステンレス製細管により行った。そして濃度分析にはガスクロマトグラフ（検出器：FIDおよびECD）を用いた。さらに、実験は一貫して20℃の恒温室内で行った。

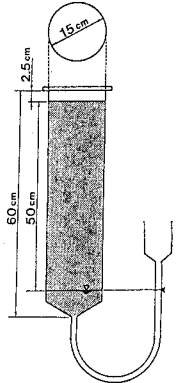
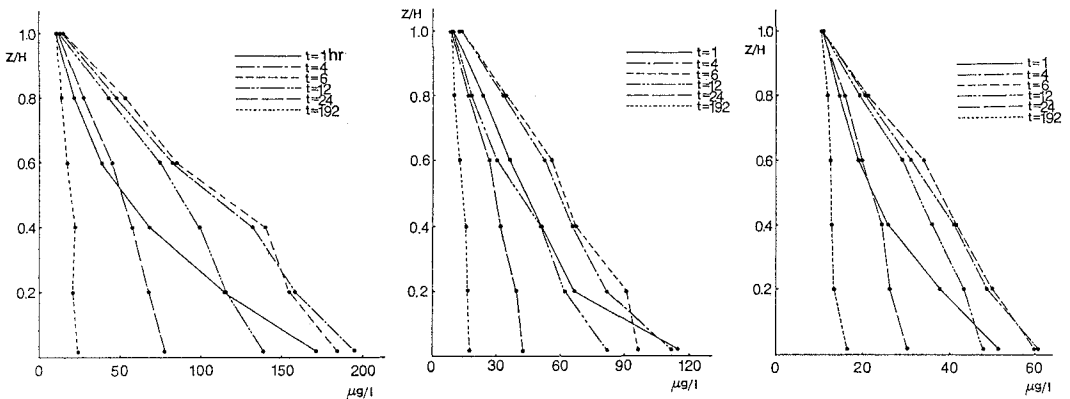


図1 実験装置

3. 実験結果 実験結果として図2にガス濃度の鉛直分布の時間変化を示す。縦軸は地下水面からの距離 z を地表面までの距離 $H = 50\text{cm}$ で除した値である。いずれのケースでも実験開始1時間後程度では曲線分布を示し、それが4～6時間程度で直線分布となり、その後も直線分布を保ちながら地下水面付近の濃度低下とともに全体的に濃度が低下している。



(a) 10.1mg/l のケース

(b) 5.4mg/l のケース

(c) 2.2mg/l のケース

図2 実験結果

4. 理論解析 本研究では地下水面から揮散した気体分子の多孔体中の移動に着目している。多孔体物質への吸着や土壌水への溶解などの影響を排除し、また温度勾配や圧力勾配などを与えずに実験を行っているた

め、現象を支配するのは濃度勾配のみである。濃度勾配による多孔体中のガス移動は、分子と分子の衝突が支配的である通常拡散領域と、分子と壁面の衝突が支配的であるクヌーセン拡散領域とでは扱い方が異なるが、この実験の多孔体の間隙スケールレベルでは通常拡散領域として扱える。また、空気に対して十分希薄な気体分子の拡散であるためFickの法則が成り立ち、分子拡散係数に多孔体の存在を考慮した補正 α を施した(1)式のような形で表せる。また、液相($-d \leq z < 0$)においても等しい補正值を用いて同形の式で表せると仮定すれば(2)式が成り立つ。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \alpha D_g \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (0 < z \leq H) \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \alpha D_L \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (-d \leq z < 0) \quad (2)$$

ここで、 C : 濃度、 t : 実験開始後の時間、 z : 気液界面を $z = 0$ として鉛直上方に正

α : 多孔体を考慮する補正係数、 D_g, D_L : 気相、液相中の分子拡散係数

上記の基礎方程式を解くためには初期条件、境界条件が必要である。ここで、初期条件は、

$t = 0$ のとき $C = C_0$ ($-d \leq z < 0$; 液相) , $C = 0$ ($0 < z \leq H$; 気相)

である。ここで C_0 は地下水の初期濃度である。

境界条件は、多孔体表面 $z = H$ 、気液界面 $z = 0$ 、液相底面 $z = -d$ において与えられる。まず、 $z = H$ では $C = C_0$ (C_0 は一般大気中の濃度で、 $C_0 \approx 0$ とおける) である。また、 $z = -d$ ではその面を通る質量フラックスがゼロであることから、 $(\partial C / \partial z) = 0$ である。また、 $z = 0$ では相平衡が成り立ち、ヘンリーの法則 ; $C_{z=0+0} = m C_{z=0-0}$ を満たす。さらに、界面での質量フラックス ; $f = -D_L (\partial C / \partial z)_{z=0-0}$ を総括物質移動係数 k を用いて表現する事により次式が得られる。

$$-D_L \left(\frac{\partial C}{\partial z} \right)_{z=0-0} = \rho k m C_{z=0-0}$$

理論的にはこれらの条件式により基礎式を解く事ができるが、現状では k の値が未知であるため厳密な解が得られていない。しかし、実験終了時間を変えて数回繰り返し実験を別途行った結果により液相の濃度が $C = C_0 \cdot e^{-\rho k t}$ と近似できる事を確かめられたため、実験結果をこの形の式に近似した。これにより計算が行え、その結果が図3である。10.1mg/lの濃度で行ったケースについて補正係数 $\alpha = 1/3$ として計算している。グラフの縦軸は z/H 、横軸は濃度を実験開始直後の界面気相側濃度 ; $C_{z=0+0, t=0}$ で除して無次元化したものである。

5. 考察および今後の課題 濃度分布は実験、計算結果とも、実験開始後の曲線分布から次第に濃度勾配が一定に近づき、直線分布となって以後は全体的に濃度が低減しているという

いう同様の傾向を示した。そのため、この現象が確かに式(1)(2)により表現できるように予想される。しかし、直線分布を示して以後の濃度の低減の早さには違いがあり、一致するとは言い難い点もある。これは先述の近似などが原因と思われ、その意味でも早急に厳密な理論計算をする事が今後の課題であるといえる。

(参考文献)

- 1) 田中信寿・神山桂一：廃棄物埋立処分地におけるガス及びガス成分の移動について—廃棄物層・土壌層を流れるガスの移動方程式とその応用—, 廃棄物学会誌, Vol. 2, No. 1, pp. 46-58, 1991
- 2) 浅野康一：物質移動論, 共立出版株式会社, pp. 11-20, 1976

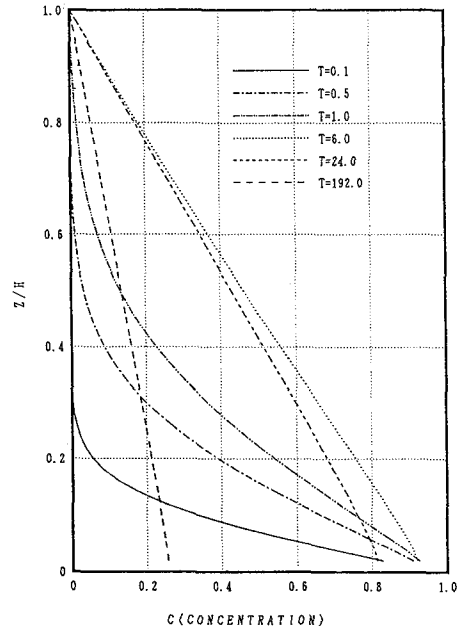


図3 計算結果 10.1mg/lのケース