

大阪大学工学部 学生員 ○田村 道昭

大阪大学大学院 学生員 李 昌洙

大阪大学工学部 正員 石井 義裕

大阪大学工学部 正員 村岡 浩爾

1. はじめに 近年、トリクロロエチレン (TCE) 等の揮発性有機塩素化合物 (VOC) による地下水汚染が問題となっている。しかし、VOC の土壌・地下水中での挙動については未だに不明な点が多いのが実状である。本研究では、水に溶解した TCE の地下水流からの揮散について不飽和帯のある場合とない場合について検討した。実験装置として恒温室に設置した二次元水槽にガラスビーズを充填したものを使い、TCE 水溶液の液相-気相間の輸送現象を流れの特性を考慮して、その説明を試みた。

2. 実験概要 実験装置は水槽の勾配を変化させることのできる長さ 300cm、高さ 35cm、幅 5cm の真鍮性の二次元直方水槽 (図-1) を用いた。実験装置上流端から、一定濃度の TCE 水溶液をポンプによって定常等流状態で流し、下流端から排水する。実験装置上面は被覆されていない。また地下水の流速は実験装置の勾配によって与える。本実験では不飽和帯のあるモデル (図-2) と不飽和帯のないモデル (図-3) について実験を行った。実験条件は表-1 に示す。モデル土壌として 1mm 粒径のガラスビーズ (空隙率 $\phi = 0.4$) を使用しており、不飽和帯部分は完全乾燥状態のガラスビーズを用いることにより土壌への吸着および間隙水への溶解等の影響を排除できるものとしている。液相部分は液相界面近傍、気液界面から 6、12cm 下方の 3 点について溶液濃度を測定した。気相部分は気液界面から 2、8、16cm 上方の 3 点について土壌ガス濃度を測定した。これらは実験装置の中央部 (上流端から 1.75m) で定点測定を行った。測定時間は 0、3、6、9、12、24 時間後としており、 $t=0$ で水槽内の濃度はすべて地下水初期濃度となっている。濃度分析はガスクロマトグラフ (ECD) で行った。また実験はすべて準備段階から一貫して、暗室状態を保った室温 20℃ の恒温室で行った。

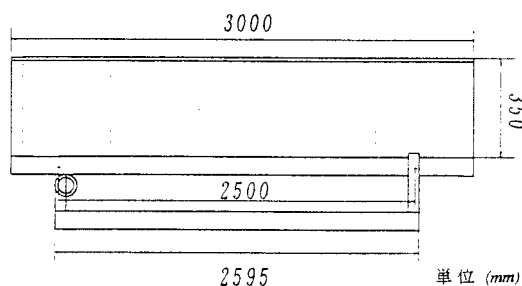


図-1 実験装置

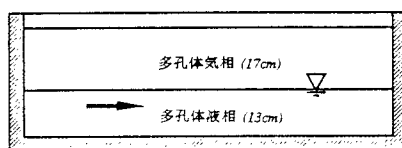


図-2 実験モデル (不飽和帯あり)

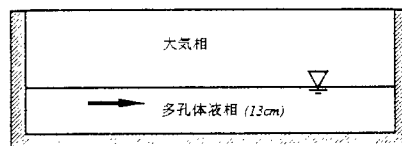


図-3 実験モデル (不飽和帯なし)

表-1 実験条件

case	モデル	地下水初期濃度(mg/l)	ダルシー流速(m/day)	空隙の平均流速(m/day)
1	不飽和帯あり	11.8	0.28	0.71
2		10.7	0.60	1.5
3	不飽和帯なし	11.8	0.25	0.62
4		10.6	0.56	1.4

3. 理論考察 (a)「不飽和帯あり」の場合

x 軸を気液界面にとり、液相及び気相の物質保存則は (1)、(2) 式で表される。

Michiaki Tamura, Changsoo Lee, Yoshihiro Ishii, Kohji Muraoka

$$\frac{\partial C_L}{\partial t} = -u \frac{\partial C_L}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 C_L}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C_L}{\partial z^2} \quad \dots(1) \quad \frac{\partial C_G}{\partial t} = \phi D_G \left(\frac{\partial^2 C_G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_G}{\partial z^2} \right) \quad \dots(2)$$

ここに C_L : 液相濃度、 C_G : ガス濃度、 t : 時間、 x, z : 座標軸、 u : 水平方向の空隙の平均流速、 D_L : 水平方向のみかけの拡散係数¹⁾ (case1,2,3,4 で $D_L = 1.47, 3.08, 1.30, 2.81 (\times 10^{-4}) (cm^2/sec)$)、 D_T : 鉛直方向みかけの拡散係数¹⁾ (case1,2,3,4 で $D_T = 1.00, 1.33, 0.97, 1.27 (\times 10^{-5}) (cm^2/sec)$)、 D_G : TCE の空気中での分子拡散係数 ($1.03 \times 10^{-1} (cm^2/sec)$)、 ϕ : 空隙率 (0.4) である。

$z = 0$ における界面においては、(1),(2) 式は次のようになる。

$$\frac{\partial C_L}{\partial t} = -u \frac{\partial C_L}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 C_L}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C_L}{\partial z^2} - Y_0 \quad \dots(3) \quad \frac{\partial C_G}{\partial t} = \phi D_G \left(\frac{\partial^2 C_G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_G}{\partial z^2} \right) + Y_0 \quad \dots(4)$$

$$Y_0 = \left. \frac{\partial C_L}{\partial t} \right|_{z=0} = \left. \frac{\partial C_G}{\partial t} \right|_{z=0} = K \left(C_{L0} - \frac{1}{H} C_{G0} \right) \quad \dots(5)$$

この (5) 式は物質移動論²⁾に従って示される表現である。ここに K : 総括物質移動係数 (l/T)、 Y_0 : 界面における液相から気相への揮発量 ($ML^{-3} T^{-1}$)、 C_{L0} 及び C_{G0} : 界面付近を代表する液相及び気相の代表濃度、 H : 無次元ヘンリー数 (0.325) である。

(b) 「不飽和帯なし」の場合

気相では液相からの揮散ガスが速やかに空気と混合するため、実用的に $C_G = 0$ とみなせる。従って濃度は液相のみで考慮すればよく、その保存式は (1) 式である。このことは高揮発性の物質に対して静止液相の界面で $C_L = 0$ が成り立つという裏付による³⁾。ここでは静止液体でなく、微流速ではあるが流れているため、厳密な検討が必要であるが、近似的に (1) 式を基本式として扱う。

4. 実験と数値計算 「不飽和帯あり」「不飽和帯なし」について液相の界面付近 ($z \approx -1.0cm$) での濃度測定結果を図4、5中の○印、◎印で示す。ここで縦軸は相対濃度 (t 時間後の濃度を地下水初期濃度で除したもの) となっている。また、液相において界面付近より下部の測定点では、濃度変化が測定されなかった。流速が速くなると濃度減少がやや著しくなることが認められる。この実測値をもとに (5) 式において Y_0 の値を推定し、 $C_{G0} = 0$ とすると case1,2 で $K = 6.8, 8.5 (\times 10^{-6}) (l/sec)$ が近似的に求まる。次に、「不飽和帯あり」の場合に、この K を用い、(1) ~ (4) 式を数値計算することにより、図4の実線、点線が得られる。また、「不飽和帯なし」の場合は (1) 式を初期条件: $C_L = C_0$ 、境界条件: $z = 0$ で $C_L = 0$ により解き、図5の実線、点線を得る。実線と数値計算はほぼ一致する結果となっている。

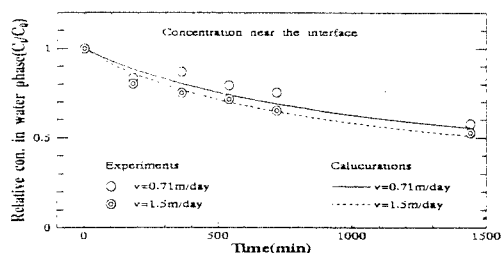


図4. 液相部分の濃度変化 (不飽和帯あり)

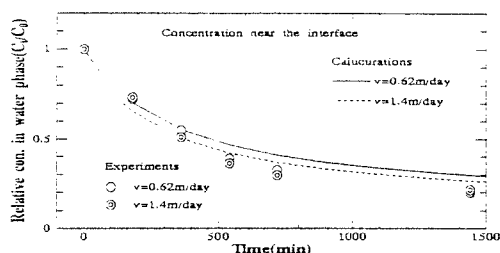


図5. 液相部分の濃度変化 (不飽和帯なし)

5. まとめ 不飽和帯の存在により、気液接触面積の減少と界面直上で汚染ガスが溜まることから揮散は抑制される。地下水流速が速くなると揮散量はやや増加する傾向にあると思われる。

6. 参考文献 1) J. Bear and A. Verruijt: Modeling Groundwater Flow and Pollution, D. Reidel publishing Company, pp159-167, 1987 2) 浅野康一: 物質移動論、共立出版、1976 3) Jiang Peng, Jatinder K. Bewtra and Nihar Biswas: Volatilization of Selected Organic Compounds from Quiescent Water, Journal of Environmental Engineering, Vol.120, No.3, 1994