



研究ノート

有機塩素化合物の水への溶解

—地下水汚染の保全対策のために—

村岡浩爾*

1. 研究のモチーフ

有機塩素化合物による地下水汚染が我が国で公的に認められたのは1981年のことである。その前年、米国シリコン・バレーで起った地下水汚染は著明である。有機溶剤として用いられるトリクロロエチレンやテトラクロロエチレン等は、その物性は明らかなので物理化学的な性状もよく知られているのだが、一旦地下圏に侵入すると土壤中の雨水浸透や地下水流によってどのような挙動をするのかよく判らない。どのように汚染が拡がるのか、いつまで汚染が続くのか、対策をどうとるべきかなどについて有効な情報を与えるには、地下水の流れという水理学的な現象のもとで有機塩素化合物の水への溶解現象を扱わねばならないように思う。

2. 地下圏での汚染現象いろいろ

汚染の場は大きく分けて広域的な地下水汚染

と、汚染源付近でこれから汚染が拡がって行こうとする局所的な場が考えられる。ここでは局所的な場を対象とし、地下水汚染が始まる機構を解明することとする。しかし地下圏での汚染開始の状態には種々の現象がある。図1はそれらをスケッチしたものだが、工場の地下タンクから有機溶剤が漏出する場合は①である。土壤の不飽和帯で②の現象を経て、③のように地下水面上に溜まる場合がある。多孔体（ここでは土壤粒子や砂礫）の規模が大きければ空隙の規模も大きいから、その時には有機溶剤は飽和帯（すなわち地下水圏）に侵入し、⑤のように一部は空隙中に粒塊として滞留し、残りは更に落下して⑥のように粘土層や岩盤の上に溜まる。一方、廃液として土壤中に埋められたと考えればそれは⑨である。この場合には雨水の浸透によって溶かされ、⑩⑪のように地下水汚染につながる。

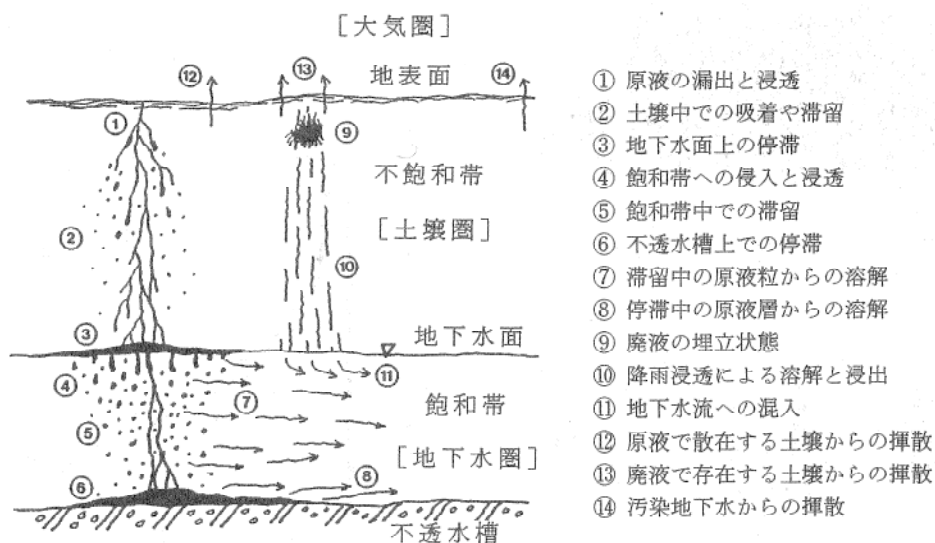


図1 地下水汚染源付近の汚染現象概要図

*村岡浩爾(Kohji MURAOKA), 大阪大学, 工学部, 土木工学科, 教授, 工学博士, 環境水理学

3. 飽和帯での溶解現象 (その1)

⑤の状態では空隙中に存在している有機溶剤が地下水流によって溶解され、⑦のように地下水汚染になる場合を考える。この時には先ず、多孔体中で有機溶剤がどういう状態で存在しているかを調べる必要がある。これには溶剤として着色したトリクロロエチレン (TCE) を用い、多孔体として砂、鹿沼土、ガラスビーズを用いて繰り返し実験をした結果、当然のことながら TCE は空隙の大きさ (従って多孔体を構成する粒径の大きさに相当) で納まっているのが多いようだ。この状態をガラスビーズの多孔体で見たのが図2である。

以上のことから多孔体中の TCE をスケッチ風に描けば図3 (a) のようになる。しかし地下水の流れによってこの状態の TCE の溶け出しを実験することは困難と考えたので、同図(b)のようにガラスビーズを用いて溶解実験を行っ

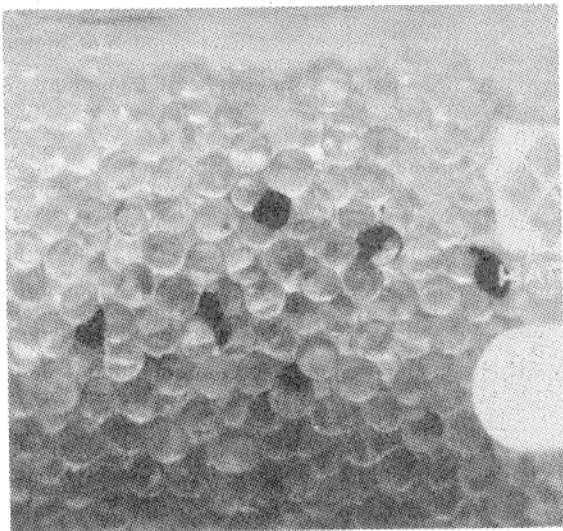


図2 飽和多孔体(3mm径ガラスビーズ)中のトリクロロエチレン塊(各14 μ l)の存在状態

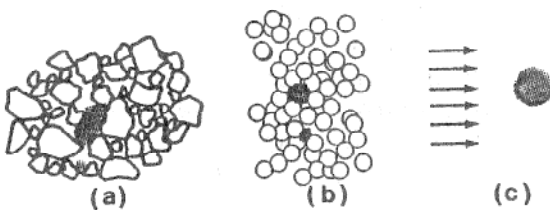


図3 多孔体中のトリクロロエチレン存在状態。(a)現実の予想図、(b)実験の状態、(c)解析モデル

た。ガラスビーズは3mm径と1mm径の2種類、これをガラス製コラム(内径60mm、高さ100mm)に充てんし、その中に所定の容量のTCE塊を注入して水を通ずる。流れの速さはダルシー流速にして平野部で考えられる大きさで5種類設定した。コラムからの浸出水を採水してガスクロマトグラフでTCEの濃度を測る。そうすれば流れによって一粒当りの溶解速度が計測できる。

これを解析的に検討するには図3 (b)でも難しい。そこで更に単純化して同図(c)のように一様流れにおいたTCE球からの溶け出しと見なす。流れを \bar{u} 、TCE球の体積 V 、表面積 S として、溶け出しによる体積変化 dV/dt が \bar{u} と S に比例すると仮定すると

$$\frac{dV}{dt} = -\alpha \bar{u} S,$$

α : 無次元定数(溶解定数と名づける) (1)

となる。 $V = (4/3)\pi r^3$ (ここに r : 球の半径)、 $S = 4\pi r^2$ であるから、式(1)は

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{3}k_1\alpha\bar{u}V^{2/3}, \text{ここに } k_1 = (4\pi/3)^{1/3} \text{ (2)}$$

これを初期条件: $t=0$ において $V=V_0$ として解くと

$$V(t) = -(k_1\alpha\bar{u}t - V_0^{1/3})^3 \text{ (3)}$$

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{3}k_1(k_1\alpha\bar{u}t - V_0^{1/3})^2 \text{ (4)}$$

となり、 V は3次曲線、 dV/dt は2次曲線の解

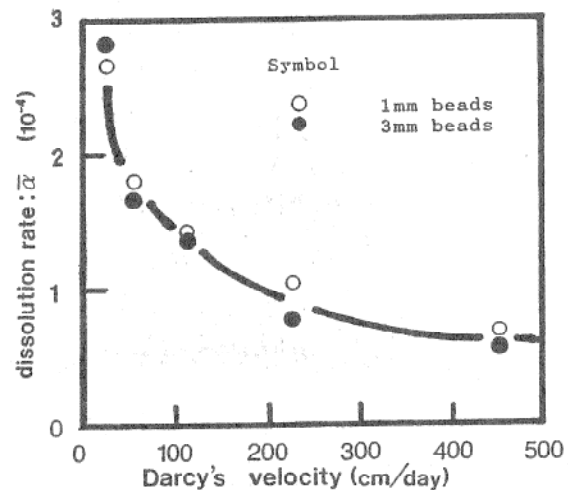


図4 溶解定数 $\bar{\alpha}$ とダルシー流速との関係

が得られる。実験からは測定時毎の V の変化が得られるので、これと式(3)と比較したらかなり良好な一致をみた。この結果、実験より得られる α の値が一つのダルシー流速 \bar{u} についていくつか求まるので、それを平均した値：平均溶解定数 $\bar{\alpha}$ が得られる。これをまとめて示したのが図4である。これによると、ガラスビーズ径、3 mm, 1 mmに拘らず、ダルシー流速を与えれば一つの $\bar{\alpha}$ が求まり、この状態の溶解現象の定量化が可能になる。

4. 飽和帯での溶解現象 (その2)

次に図1の⑥の状態からの溶解を考える。しかし現実⑥がどんな状態だか判らないのだが、少なくともこれまでの準備実験からこういう状態があり、従ってそれからの溶解が地下水汚染の源になっていることは確かである。

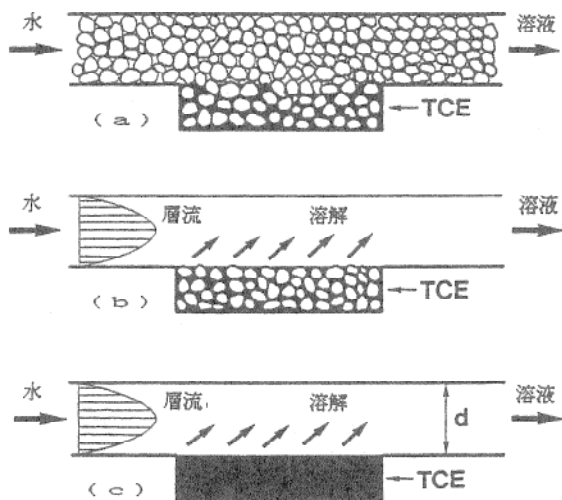


図5 2層界面溶解現象の実験系概要図

そこで実験系で考えられる現象として図5の場合を考える。厚み d で層流が流せるような長方形断面の管を真ちゅう製で作る。その一部に凹みを作ってそこにTCEを溜め、上部の水流によって溶解を生ぜしめる。現実を再現するのは同図(a)で、管内を多孔体とし、多孔体中の流れ(つまり地下水流)による溶解を扱う。しかし、いきなり(a)を扱うのも難しいため、その基本と考えられる水とTCEの二層を考え、その界面からの溶解に着目するのが(c)である。なお、(b)は両者の中間的なものとしておこう。

実験を行ったのは(c)の状態である。流速は地下水流を想定して低レイノルズ数 Re の範囲 ($Re=0.25\sim 16$) で設定した。排水中のTCE濃度は、通水直後は値が乱れるがすぐに安定する。この時の濃度から界面の単位面積、単位時間当りの溶解量が求まる。これを溶解速度 U_e という速度の次元で表わすとすれば、これは $U_e = (QC_{TCE}) / (\rho_{TCE}A)$ で求まる。ここに Q : 排水の流量 [L^3/T] , C_{TCE} : 排水中のTCE濃度 [M/L^3] , ρ_{TCE} : TCEの密度 [M/L^3] , A : 界面の面積 [L^2] である。この U_e を支配するのは常識的には摩擦速度 U_* である。この値は層流の流速分布より壁面での剪断力 τ_0 が求まるから、 $U_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$, (ここに ρ : 水の密度) で計算できる。

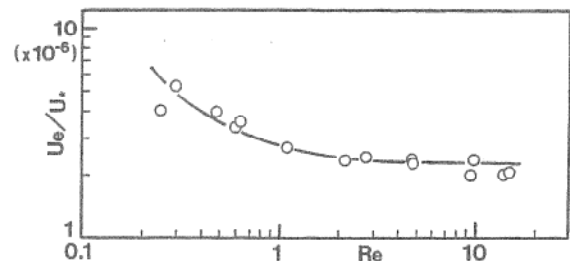


図6 レイノルズ数に対する無次元溶解速度 U_e/U_* の変化

無次元量 U_e/U_* とレイノルズ数 Re との関係を整理したのが図6である。界面の溶解を U_* と関係づけるのは溶解現象を摩擦抵抗を反映するものと見ることである。だから図6で期待していたのは層流抵抗の相似性から U_e/U_* が一定値をとることであった。しかし Re 数の小さい所で U_e/U_* が変化している。この原因は何だろうか。

5. おわりに

3. で得た飽和帯で分散して存在しているTCEの溶解の定量式は、現場の汚染規模や汚染持続性を検討するのに役立つ。しかし水理学的な観点からは式(1)のような簡単な仮定で現象が説明できるのかという議論もあり、今後の検討が必要だ。4. で得た知見は多孔体中の二層流場の溶解現象を対象とする点で水理学的に興味深い。以上の現象は、我が国では

もちろん、外国でもびったりと合う研究資料が少なく、目新しい部分が多い。それだけでなく、地下水の汚染源周辺について、図1に示した多くの局所的な現象の解明が残っているようだ。

この研究の一部は昭和63年度からの東レ科学振興会の研究助成で行っている。記して、関係者に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Geller, J. T. and J. R. Hunt (1989) : Non-Aqueous Phase Organic Liquids in the Subsurface : Dissolution Kinetics in the Saturated Zone, Int'l Symp. on Processes Governing the Movement and Fate of Contaminants in the Subsurface Env., Paper Abstracts, USA.
- 2) 松井俊二・玉井昌宏・村岡浩爾 (1990) : 水/トリクロロエチレン二層界面における溶解現象に関する基礎的研究, 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要, II-45, 大阪.
- 3) Muraoka, K. and T. Hirata (1990) : Basic Study on TCEs Behavior in Subsurface Environment, Water Sci. Tech., Vol. 22, No. 6, pp. 79~86.
- 4) 村岡浩爾・玉井昌宏・大西淳・平田健正 (1990) : 多孔体中のトリクロロエチレン粒塊の溶解について, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第2部, II-104, 新潟.

