

トリクロロエチレンの河川から地下水系への輸送

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

鳥取大学乾燥地研究センター

正員 舩井 和朗

通産省公害資源研究所

鷺見 栄一

1. はじめに

近年、トリクロロエチレンなどの有機塩素化合物による地下水汚染が社会問題として大きく取り上げられている。有機塩素化合物は現在多くの産業で洗浄剤として使用されていて、低濃度でも飲用し続けると人体に悪影響を及ぼす可能性があるといわれている。一般に有機塩素化合物の物理化学的特性として粘性が低いこと、原液の比重が大きいことなどの性質をもつため地下への浸透が容易で、その結果広範囲にわたって地下水を汚染すると考えられている。^{1), 2)}

そこで、本研究では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トリクロロエチレンの河川から地下水系への輸送過程をF県A市の現地データを参考に数値計算を行い検討する。

2. 現地概要

図-1には本研究で対象とした河川周辺の帯水層の縦断面の概略を示している。この河川は大部分がコンクリートで被覆されているが、一部分だけ自然河床になっている区間があり、その区間からの侵入が考えられる。帯水層は2層に分かれ、上層は層厚が0.4~0.5mと薄く、細砂を主体とした砂質土層で小さなレキも混入している。下層は直径150~300mmの玉石が多量に混入する砂レキ層であり、現場透水試験では透水係数が0.167cm/secであった。

3. 数値計算による検討

(1) 計算に用いる基礎式

ここでは、トリクロロエチレンの河川から地下水系への輸送過程について数値計算によって検討する。図-1に示す水平二次元断面不飽和-飽和帯水層における地下水流れとトリクロロエチレンの輸送に関する基礎式は、水平方向にX軸、鉛直上向きにY軸をとると次式で示される。

・地下水流れの式:

$$\{C_w + \alpha S\} \partial h / \partial t = -\partial u / \partial X - \partial v / \partial Y \quad \text{--- (1)}$$

$$u = -k(\partial h / \partial X), \quad v = -k(\partial h / \partial Y + \rho / \rho_f) \quad \text{--- (2)}$$

・二次元移流分散方程式:

$$\begin{aligned} & \partial (\theta C) / \partial t + \partial ((u' / R_d) \theta C) / \partial X + \partial ((v' / R_d) \theta C) / \partial Y \\ & = \partial ((\partial D_{xx} / R_d) \cdot \partial C / \partial X + (\partial D_{xy} / R_d) \cdot \partial C / \partial Y) / \partial X \\ & + \partial ((\partial D_{yx} / R_d) \cdot \partial C / \partial X + (\partial D_{yy} / R_d) \cdot \partial C / \partial Y) / \partial Y \end{aligned} \quad \text{--- (3)}$$

ここに、 C_w : 比水分容量、 S : 比貯留係数であり、式(1)の係数 α は不飽和領域では0、飽和領域では1の値をとる変数である、 h : 圧力水頭、 t : 時間、 k : 透水係数、 ρ_f : 地下水の密度、 ρ : 流体密度(トリクロロエチレンの地下水中の密度効果を考えないときは $\rho = \rho_f$ とする)、 θ : 体積含水率、 C : トリクロロエチレン濃度、 u, v : X, Y方向のDarcy流速、 u', v' : 実流速、 $D_{xx}, D_{xy}, D_{yx}, D_{yy}$: 分散係数で帯水層の分散に関する等方性を過程すると、次式のように流速依存型で与えられる、

$$\begin{aligned} \theta D_{xx} &= \alpha_L u'^2 / V + \alpha_T v'^2 / V + \theta D_n \\ \theta D_{yy} &= \alpha_T u'^2 / V + \alpha_L v'^2 / V + \theta D_n \end{aligned} \quad \text{--- (4)}$$

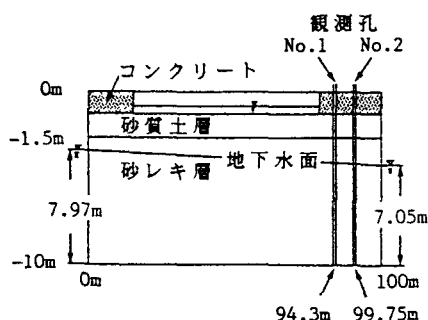


図-1 現地概略図

$$\theta D_{xy} = \theta D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_T) u'v' / V$$

ここに、 $V = (u'^2 + v'^2)^{1/2}$ 、 α_L ：縦方向分散定数、 α_T ：横方向分散定数、 D_m ：分子拡散係数、 R_0 ：土壤に含まれる有機炭素への吸着による遅れ係数で次式のように示される：

$$R_0 = 1 + ((1-n)/n) \cdot \sigma_s \cdot K_{oc} \cdot (OC) \quad \text{--- (5)}$$

ここに、 n ：空隙率、 σ_s ：土壤の密度、 (OC) ：有機炭素の質量濃度、 K_{oc} ：比例定数でオクタノール／水・分配係数 K_{ow} との間の相関は、

$$\log K_{oc} = \lambda \cdot \log K_{ow} - \beta \quad (\lambda = 1.00, \beta = 0.21) \quad \text{--- (6)}$$

(2) 計算条件

河川中のトリクロロエチレン濃度の減衰は一次反応に従うものとするとして、次式で与える。

$$C = C_0 \cdot \exp(-K/U \cdot X)$$

ここに、 C_0 ：A点におけるトリクロロエチレン濃度(100.0%)、 U ：河川水の平均流速(50cm/sec)、 K ：減衰定数(6.5E-4/sec)、 C ：自然河床が始まる点からXm下流の地点の河川水中の濃度である。次に、飽和透水係数として、上層に0.003cm/sec、下層に0.167cm/secを与えた。空隙率0.3、縦・横方向分散定数は上層には0.02m, 0.001mを与え、下層には現地トレーサー試験による実測値と解析解との比較により0.28m, 0.016mを与えた。分子拡散係数 $10^{-9} \text{m}^2/\text{sec}$ 、遅れ定数については、現地地盤の有機炭素量を測定し1.5mまでの上層に対して $R_d = 1.312$ を与えた。

数値計算の方法は、式(1)の圧力水頭hに関しては陰形式の差分法であるADI法を用いている。式(3)の濃度Cの数値解は、移流によるトリクロロエチレン濃度の輸送を精度よく算定できる粒子移動法(特性曲線法)を用いている。X、Y方向差分格子間隔は100cm, 25cmである。

(2)、計算結果

図-2, 3には、トリクロロエチレンの河川からの侵入状況の数値解(流速ベクトルと等濃度線)を示している。地下水流れについては上流側の地下水面が河床に近く、浸透流速が下流に比べて大きくなっている。これは地下水面に近いところでは土壤水分率が高く、従って不飽和透水係数が大きくなったためである。次にトリクロロエチレンの侵入状況を見ると自然河床の開始点近傍での濃度が高いこと及び浸透速度が大きいことから上流側からのトリクロロエチレンの輸送が卓越している。さらに時間が経過すれば、帯水層の1/3程度までの広がりが予想される。

4. 結び

本報では、自然河床からのトリクロロエチレンの地下水系への輸送過程の機構を明らかにするために数値計算モデルの適用を試みた。現地の水文地質パラメータについての概ね把握できた。今後は計算格子間隔を小さくするなどして計算モデルの精度向上を計りたい。

参考文献

- 1) 藤縄克之：汚染される地下水、共立出版、1990年
- 2) 神野健二他：テトラクロロエチレンによる地下水汚染についての水文学的考察、日本地下水学会誌、28(3)、1986

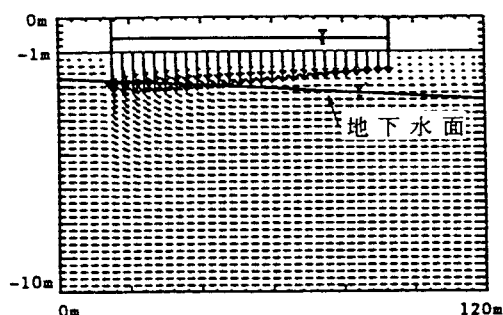


図-2 流速ベクトル

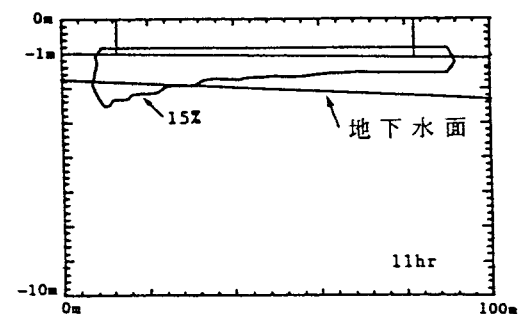


図-3 等濃度線(11時間後)