

II-54

成層帯水層における溶質移行特性

室蘭工業大学工学部 正員 藤 間 聡

1. はじめに

環境庁が昭和57年に全国の主要15都市で実施した地下水汚染実態調査によって、トリクロロエチレン等の有機塩素系溶剤による汚染が予想を越えて広範囲にわたる状況であることが明らかにされた¹⁾。しかし地下水汚染は大気汚染、表流水の水質汚染と異なり具視的な現象でないため、地域住民の関心は必ずしも高くなく、直接的な被害が生じなければ表面化することは少ない²⁾。地下水は一度汚染されると希釈されるまでに長期間を要するため、汚染の未然防止と早期処理の抜本的対策の確立が急務である。

地下水汚染機構の理論的解明に関しては、現在に至るまで多数の研究がなされ、多孔体空隙内の流速変動に基づく微視的な分散特性についてはほぼ解明されている³⁾。特に、分散係数は流速と多孔媒体固有の分散率(dispersivity)との積で定義されるという有用な知見を得ている⁴⁾。この分散率は未攪乱試料を用いたカラム実験では0.1~2cmのオーダーにある⁵⁾。しかし、原位置分散試験においては、分散率はトレーサの流動距離に伴い増大し、試験規模によっては100m以上に達するなど一意的に求めることができない⁶⁻⁷⁾。

本研究は、透水係数の異なる多層から構成される帯水層において、地層構造の不均質に基づく溶質の巨視的分散現象を考察し、その基本的な特性を明確にする。その後、巨視的分散係数を推定する方法を提示し、モデル計算によってその具体的な検討を行う。

2. 成層帯水層における分散方程式の定式化

解析対象の帯水層は、図-1に示す透水係数の異なる多層で構成される二次元水平被圧帯水層であり、層厚は一定で水平方向には無限とする。ただし、各層は均質かつ等方性の多孔体でそれぞれ構成されているものとする。この帯水層を以後成層帯水層と呼称する。浸透流の流向は層に平行で、流速は鉛直方向の位置の関数で与えられるせん断流とする。この流れの場に保存系のトレーサを鉛直方向に線状で放出した場合、各層内のトレーサの挙動は、次式の移流拡散方程式で表される。ただし、分子拡散は無視する。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} - u_i C \right) \quad \dots(1)$$

ここに、 x_i ($i=1, 2, 3$)は直交座標系、 u_i ($i=1, 2, 3$)は各座標軸方向の実流速の成分、 t は時間、 D_{ij} は分散係数のテンソルをそれぞれ表す。 D_{ij} は浸透流の流向が x_1 方向に一致する場合には、次式で表すことができる⁸⁾。

$$D_{11} = \varepsilon_L u, \quad D_{22} = D_{33} = \varepsilon_T u, \quad D_{ij} = 0 \quad (i \neq j) \quad \dots(2)$$

ここに、 ε_L は縦方向分散率、 ε_T は横方向分散率を表す。

縦、横方向分散率に関しては多数の実験的、理論的考察が加えられ、横方向分散率は縦方向分散率に比較して1オーダー程度小さいことが知られている⁹⁾。従って、本解析では横方向(x_1 に直角方向)分散の寄与を無視する。

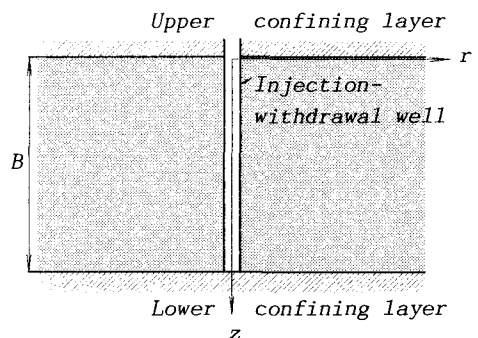


図-1 成層被圧帯水層

Analysis on Contaminant Migration in Stratified Aquifer.

by Satoshi TOHMA

以後の解析を容易に行うため、(2)式を(1)式に代入した後、(1)式を流線に沿った曲座標系に変換する。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial s} = \varepsilon_L u \frac{\partial^2 C}{\partial s^2} \quad \dots(3)$$

ここに、 s は流線に沿った長さを示す。

上式は実流速 u が s の関数であるため、非線形となり直接的に解析解を求めることは一般に困難である。従って、次式で定義する変数変換を行う。

$$\xi(s) = \int_{s_0}^s \frac{ds}{u} \quad \dots(4)$$

上式の変数 ξ は $s_0 \sim s$ 間の距離を地下水が移動するのに要する時間と考えられる。(4)式を用いて(3)式の変数変換を行うと次式が得られる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial \xi} = \frac{\varepsilon_L}{u} \frac{\partial^2 C}{\partial \xi^2} \quad \dots(5)$$

再び、変数変換 $\eta = \xi - t$, $\tau = t$ を行うと次の非線形熱伝導型方程式を得る。

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \frac{\varepsilon_L}{u} \frac{\partial^2 C}{\partial \eta^2} \quad \dots(6)$$

ここで、次の変数変換を行う。

$$\alpha = \int_0^\tau \frac{d\tau}{u} \quad \dots(7)$$

(7)式を用いると(6)式は次式に変換される。

$$\frac{\partial C}{\partial \alpha} = \varepsilon_L \frac{\partial^2 C}{\partial \eta^2} \quad \dots(8)$$

以上の変数変換を行うことにより非線形拡散型方程式(1)式が解析可能な線形熱伝導型方程式(8)式に変換されたことになる。

ここで、初期条件(9)式の下でトレーサを連続放出した場合の(8)式の解は(10)式で与えられる。

初期条件: $t = 0 \quad C = 0$

$$s \rightarrow \infty \quad C = 0 \quad \dots(9)$$

$$C/C_0 = 1/2 \cdot \operatorname{erfc}(\eta / \sqrt{4\varepsilon_L \alpha}) \quad \dots(10)$$

ここに、 C_0 はトレーサの放出時の濃度、 $\operatorname{erfc}(\cdot)$ は余誤差関数を表す。

図-1に示す半径 r_w の完全貫入井から濃度 C_0 のトレーサを含む水を連続注水した場合、任意地点 r における浸透流の流速は次式で与えられる。

$$u = Q_r / (2\pi n B r) \quad \dots(11)$$

ここに、 Q_r は単位時間当たりの注水量、 n は空隙率、

B は帯水層厚、 r は井戸中心軸からの水平距離。

いま、 $s = r - r_w$ と置くと、(4)式の ξ 及び(7)式の α はそれぞれ次のように与えられる。

$$\xi = \frac{\pi n B (r^2 - r_w^2)}{Q_r} \quad \dots(12)$$

$$\alpha = \frac{(2\pi n B)^2 (r_f^2 - r_w^2)}{3 Q_r^2} \quad \dots(13)$$

ここに、 r_f はトレーサのフロント位置を表す。

(12)式の ξ を η に変換した後、(13)式の α とともに(10)式に代入すると、注水期間の各層内の任意位置 r における濃度 C が求められる。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{r^2 - r_w^2}{[16\varepsilon_L (r_f^3 - r_w^3)/3]^{1/2}} \right\} \quad \dots(14)$$

トレーサフロントが距離 R に達したとき、流量 Q_p で揚水を開始した場合、揚水期間の各層内の任意位置における濃度は(14)式と同様に次式で与えられる。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{r^2 - r_f^2}{[16\varepsilon_L (2R^3 - r_f^3 - r_w^3)/3]^{1/2}} \right\} \quad \dots(15)$$

トレーサを放出した井戸における揚水期間の各層内のトレーサ濃度の経時変化は、(14)、(15)式を距離 R でマッチングさせ、 $r = r_w$ と置くことにより得られる。ただし、 $R \gg r_w$ と仮定する。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{(3R/16\varepsilon_L)^{1/2} (V_p/V - 1)}{[(2 - |1 - V_p/V|)^{1/2} (1 - V_p/V)]^{1/2}} \right\} \quad \dots(16)$$

ここに、 V は注水量、 V_p は揚水量で $V_p = Q_p t$ 。

以上の展開により均質等方性の多孔体から成る各層内における濃度の経時変化が得られた。

ここで、成層帯水層の巨視的な分散率を求めるため、各層の透水係数を重みとした(16)式の加重平均を、井戸における平均濃度の算定式と定義する。

$$\bar{C} = \frac{1}{2B} \int_0^B [\operatorname{erfc}[3R\phi/16\varepsilon_L\phi]^{1/2} (V_p/V - 1) / (2 - |1 - V_p/V|^{1/2} (1 - V_p/V))^{1/2}] \phi dz \quad \dots(17)$$

ここに、

$$\phi = k/\bar{k}, \quad \phi = \varepsilon_L / \bar{\varepsilon}_L \quad \dots(18)$$

$$\bar{k} = \frac{1}{B} \int_0^B k dz, \quad \bar{\varepsilon}_L = \frac{1}{B} \int_0^B \varepsilon_L dz.$$

3. 解析結果

前章で得られた解析手法を、詳細に観測データが提示されているPickensらの原位置分散実験¹⁰⁾に適用し、その妥当性を検証するとともに巨視的分散率を求める。解析対象帯水層は粘土層に挟まれた層厚8.2mの砂層で構成される被圧帯水層である。帯水層の透水係数 k は鉛直線上18点で測定され、 $4.6 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ の範囲にあり、平均値は $\bar{k} = 1.4 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ である。図-2は測定された透水係数の鉛直方向の変化を示す。ただし、測定値は平均値によって無次元化がなされ、(18)式の ϕ の値を与える。縦方向分散率 ε_L は各層毎のトレーサ実験から0.2~3.5cmの値にあり、その平均は $\bar{\varepsilon}_L = 0.7 \text{ cm}$ である。図-3は透水係数と同様に縦方向分散率の無次元化表示であり、(18)式の ϕ の値を与える。また、空隙率 n は0.36の一定値である。

分散実験は、 $Q_r = 0.886 \text{ l/s}$ の一定流量で $T = 30$ 時間にわたり総水量 $V = 95.6 \text{ m}^3$ を帯水層に注水し、同時にトレーサとして沃化ナトリウムを 0.083 ml/s の流量で連続放出した。注水終了後直ちに揚水を開始し、注水時と同一の流量 $Q_p = 0.886 \text{ l/s}$ で48時間揚水を行い、トレーサ濃度の経時変化を放出井において連続的に記録した。ここで、注水終了時のトレーサフロントの位置 R は次式で求められる。

$$R = (Q_r T / \pi n B)^{1/2} \quad \dots(19)$$

上記の実験条件を用いると注水開始後30時間におけるトレーサフロントの位置は $R = 3.174 \text{ m}$ と算定される。

図-4は注・揚水井戸におけるトレーサの断面平均濃度の経時変化を、 R 、 ϕ 及び ψ を(17)式に代入し、台形公式による数値積分を行って求めたものである。計算値は良い精度で実験値の分布特性を表していることが認められる。この濃度破過曲線の相対濃度 $\bar{C}/C_0$ の0.84~0.16間を分散帯と定義すると、巨視的縦方向分散係数 K_L は次式で求められる¹¹⁾。

$$K_L = (r_{0.16} - r_{0.84})^2 / 8 t_{0.5} \quad \dots(20)$$

ここに、 $r_{0.16}$ は相対濃度0.16の位置、 $r_{0.84}$ は相対濃度0.84の位置、 $t_{0.5}$ は相対濃度0.5が井戸に達するまでに要する時間。本解析における平均実流速は $u = 2.94 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ と推定されることから、 $r_{0.84} = 4.95 \text{ m}$ 、 $r_{0.16} = 7.75 \text{ m}$ 、 $t_{0.5} = 108,000 \text{ sec}$ が得られる。従って、巨視的分散係数は $K_L = 4.54 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ となり、巨視的分散率は $A_L = K_L / u = 0.154 \text{ m}$ となる。この値は各層の微視的分散率の平均 $\bar{\varepsilon}_L = 0.007 \text{ m}$ の約22倍となる。

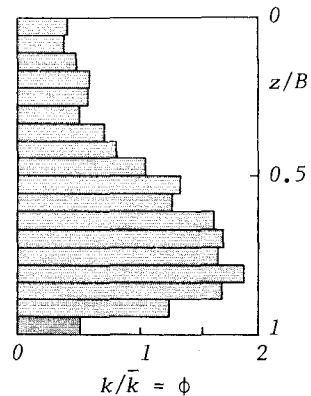


図-2 成層帯水層の透水係数分布¹⁰⁾

4. 結論

成層帯水層における分散現象を解析的に取り扱い、提示した断面平均濃度の推定式をPickensらの原位置分散実験に適用し、その妥当性を検証した。

分散方程式を用いて地下水汚染の範囲及び濃度の経時変化を推定した上、汚染防止対策を講ずる場合、分散係数の決定が重要な問題となる。本解析結果から、微視的分散率を成層帯水層の分散現象に適用すると分散帯を過小に評価する可能性が高く、原位置における分散現象を正確に推定できないと考えられる。

本解析で取り扱った成層帯水層は、透水係数および分散率について正確なデータが存在するものであったが、透水係数の違いによる浸透流の不均質性が分散に与える影響を明らかにする

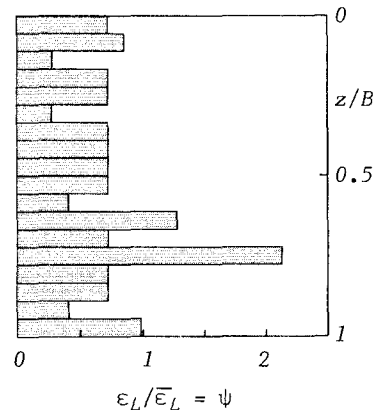


図-3 成層帯水層の分散率分布¹⁰⁾

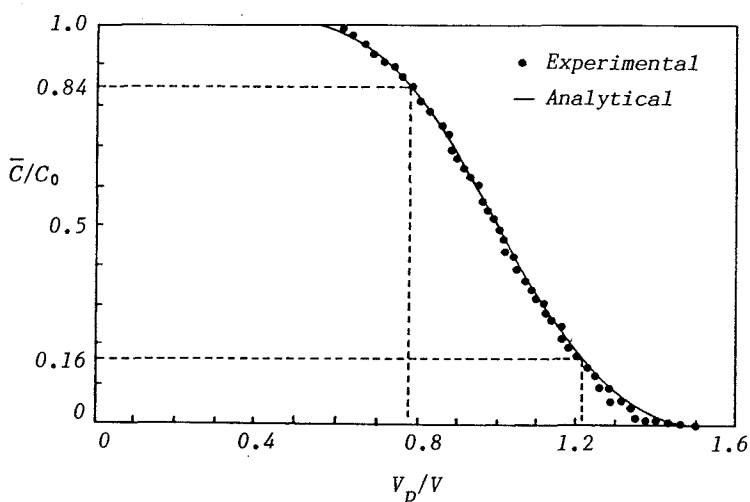


図-4 注水・揚水井戸における断面平均濃度の経時変化¹⁰⁾

ことができたと考えられる。しかし、成層帯水層における分散現象は、透水係数の空間分布ばかりではなく分散試験の規模によって著しく異なることが予測される。試験規模が大きくなるに従って、透水係数の大きな層内においては、主流方向の濃度勾配よりも主流に直角方向の濃度勾配が大きくなり、いわゆる混合現象が卓越するようになる。今後はこの効果も考慮できるよう研究を進める所存である。

参考文献

- 1) 環境庁水質保全局:昭和57年度地下水汚染実態調査結果, p. 30, 1983.
- 2) 真柄泰基, 矢野久志:水質汚濁防止法の改正と展望, 地下水汚染(8), 地下水学会誌, Vol. 32, No. 1, pp. 35~40, 1990.
- 3) Fried, J. J., and M. A. Combanous: Dispersion in porous media, Adv. Hydroscience, Vol. 7, pp. 169~282, 1971
- 4) Klotz, D. et al.: Dispersivity and velocity relationship from laboratory and field experiments, J. Hydrol., Vol. 45, pp. 169~184, 1980.
- 5) Freeze, R. A., and J. A. Cherry: Groundwater, p. 604, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1979.
- 6) Anderson, M. P.: Using models to simulate the movements of contaminants through groundwater flow systems, Crit. Rev. Environ. Contr., Vol. 9, pp. 97~156, 1979.
- 7) Hatton, T. A., et al.: Dispersion of tracer solutes in flowing groundwater, Water Resour. Res., Vol. 20, No. 9, pp. 1253~1259, 1984.
- 8) Bachmat, Y., and J. Bear: The general equations of hydrodynamic dispersion in homogeneous, isotropic porous mediums, J. Geophys. Res., Vol. 69, No. 12, pp. 2561~2567, 1964.
- 9) Rumer, R. R. Jr.: Longitudinal dispersion in steady and unsteady flow, Proc. ASCE, Vol. 88, HY4, pp. 147~171, 1962.
- 10) Pickens, J. F., and G. E. Grisak: Scale-dependent dispersion in a stratified granular aquifer, Water Resour. Res., Vol. 17, No. 4, pp. 1191~1211, 1981.
- 11) Bear, J.: Hydraulics of groundwater, pp. 271~272, McGraw-Hill, New York, 1979.