

大阪産業大学工学部 都市創造工学科 学生会員 ○和田 壮司
大阪産業大学工学部 都市創造工学科 正会員 藤長 愛一郎

1. はじめに

土壌・地下水汚染が 1990 年代から日本で社会問題となっている。汚染された土地を完全に浄化すると高額な費用が掛かるので、汚染された土地の約 4 割が放置されている。特に近年、ガソリンスタンドの地下タンクから漏れたベンゼンの地下水汚染が問題になっている。ベンゼンは揮発性のため地盤付近に存在し、長期的に吸入すると健康を害するため、汚染の広がりを予測して対策するリスク管理が必要となる。そこで本研究では、かつてベンゼン汚染された熊本県東野地区¹⁾の土壌を用いて、土壌カラム実験をした。その結果を用いて、移流・拡散に吸脱着を考慮したモデル式を用い、実際の汚染現場における濃度変化予測を試みた。

2. 実験および解析方法

土壌カラム下部からポンプを用いて内部に水を一定流量注入し、上部の流出口より流出させる（図 1）。注入する水の流速は現場流速を計算して 2.9×10^{-4} (cm/s) とした。実験装置は内径 9.0cm、高さ 15.7cm のアクリル樹脂で作製した。土壌の間隙率は 0.4 とした。

実験は、ベンゼン濃度 44mg/l を注入口(φ1mm)から 20ml 注入し、流出口につないだチューブから試料を採水した。ベンゼンの分析は、50ml 密閉瓶に試料を 20ml 入れ、30 秒間振り 3 分間以上静置し、ガスマトグラフを用いて測定した。

実験後、ベンゼン濃度の時間変化の予測するために、移流・分散方程式を用いた解析を解析解と吸着・脱着を考慮した数値解による解析を試みた。

2.1 一次元移流・三次元分散方程式を用いた解析解

解析には、一次元の移流に三次元の拡散を考慮した方程式(1)の解析解²⁾に準じた式(2)を使用し、分散係数を、最小二乗法を用いて算出する。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad \dots(1) \quad C = \frac{C_0 \cdot V_0}{8(\pi \cdot t)^{\frac{3}{2}} \left(D_x \cdot \frac{D_x}{10} \cdot \frac{D_x}{10} \right)^{\frac{1}{2}}} \exp \left(-\frac{(x-v \cdot t)^2}{4 \cdot D_x \cdot t} \right) \quad \dots(2)$$

ここで、 C : 水溶液中ベンゼン濃度(mg/l) C_0 : ベンゼン注入濃度 44(mg/l), V_0 : ベンゼン注入量(cm^3), v : ベンゼン流速(cm/s), D_x : 流れ方向の分散係数, D_y, D_z : x に直角方向の分散係数 (D_y, D_z : D_x の 1/10 の値), x : 土壌厚さ (15.7 cm), t : 注入からの経過時間

2.2 一次元移流・二次元分散方程式に土壌への吸着・脱着考慮した式

水溶液中濃度の一次元移流・二次元分散方程式(3)に土壌への吸着・脱着考慮した式³⁾を式(4)に示す。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} + D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad \dots(3) \quad \frac{\partial S}{\partial t} = k_1 C - k_2 S \quad \dots(4)$$

ここで、 u : 水の間隙流速(cm/s), S : 土壌中ベンゼン濃度(mg/l), k_1 : 吸着の反応速度係数(1/s), k_2 : 脱着の

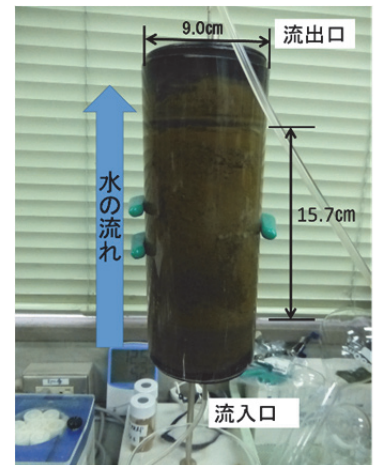


図 1 実験装置

反応速度係数(1/s)

平衡時には $k_1C - k_2S = 0$ で、 $S = \frac{k_1}{k_2}C$ となる。

吸着実験から、 $\frac{k_1}{k_2} = 0.67$ となった。

式(1)と式(2)を時間については前進差分, 空間については中心差分で近似し, 計算条件は, 格子 20×20 , 時間刻み幅 $\Delta T = 30$ (s), Step 数=3000回 (25 時間), 注入条件は, 注入口(図 2 参照)からベンゼンが 44 mg/ℓ で Step 数=36 回(18 分後: 実際の実験条件)からベンゼンが 0 (mg/ℓ) になる。また, 水の間隙流速は, $2.9 \times 10^{-4} / 0.4 = 7.3 \times 10^{-4}$ (cm/s) とした。

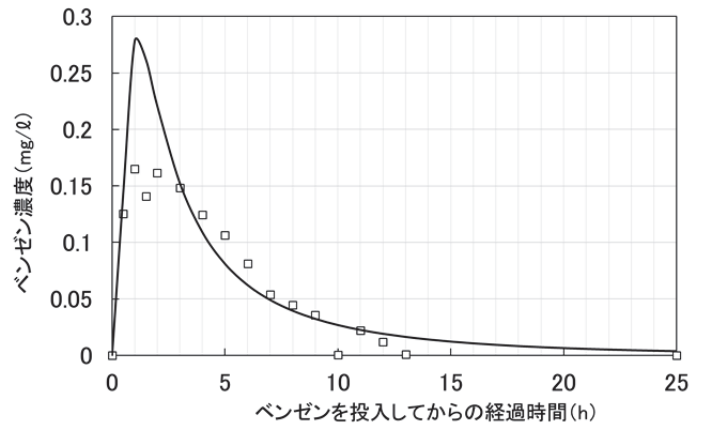


図2 ベンゼン排出濃度の実測値と解析解

3. 実験の結果および考察

図2に, 式(2)を用いて計算したベンゼン排出濃度を示す. 実測値との最小二乗法より ν は 2.7×10^{-4} (cm/s), Dx は 1.0×10^{-2} (cm/s) となった. 式(3)の数値解については, 吸着・脱着を考えなかった場合は, Dx は 3.2×10^{-3} (cm²/s) で, ベンゼン濃度が実測より高くなった. $k_1/k_2 = 0.67$ の場合, 最小二乗法を用いて, Dx は 3.2×10^{-3} (cm²/s), k_2 は 1.0×10^{-2} (1/s) となった。

さらにベンゼン濃度ピークを実測に合わせた場合, Dx は 4.8×10^{-3} (cm²/s) となった. $k_1/k_2 = 0.67$ を変更して実測値に近づけた結果を図の3に示す. 最小二乗法では, Dx は 3.2×10^{-3} (cm²/s), k_2 は 1.0×10^{-4} (1/s), $k_1 = 1.5 \times 10^{-4}$ (1/s) となった. さらに濃度ピークを合わせた場合, Dx は 6.0×10^{-3} (cm²/s), k_2 は 1.0×10^{-4} (1/s), $k_1 = 2.0 \times 10^{-4}$ (1/s) となった. これらの結果より, 吸着・脱着を考慮しないと, 濃度が実測値よりも高くなった. 一方, 吸着・脱着を考慮した場合には, ピーク濃度を実測値と合わせることが出来た。

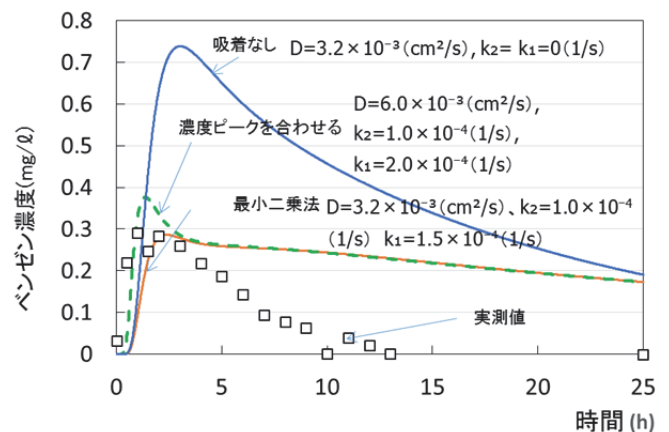


図3 ベンゼン排出濃度の各種計算値

4. まとめ

本研究では, ベンゼン汚染現場の土壌を用いて土壌カラム実験を行い, ベンゼンの水溶液中濃度の移動を一次元の移流, 二次元の分散方程式に土壌への吸着・脱着を考慮して解析した. その結果, 吸着を考慮すると, 実際のベンゼン排出のピーク濃度を表現することが出来た. しかし, ピーク濃度の1時間~1.5時間以後の減少は実測の方が速く, 予想できていない. これは脱着の式に問題があると考えられる。

参考文献

- 1) 土壌環境センター: 平成16年度 MNAに関する調査研究報告書, 2005.
- 2) Baetlsé, L.H.: Migration of radionuclides in porous media, In A.M.F. Duhamel Progress in Nuclear Energy Series VII, Health physics, Pergamon Press, Elmsford, New York, pp.707-730, 1969.
- 3) Kooten J.J.A.: A method to solve the advection-dispersion equation with a kinetic adsorption isotherm in Water Resources, Vol.19, No.4, pp193-206, 1996.