

大阪産業大学都市創造工学科 正会員 ○藤長 愛一郎
大阪産業大学都市創造工学科 趙 久銘

1. はじめに

土壌汚染対策法が2003年に施行されて以来、汚染された土地をリスク管理しながら使用方法として、比較的安価なバイオレメディエーションや自然減衰法(Natural Attenuation)などの原位置浄化法が着目され、措置方法として選択されている。しかしながら、原位置浄化法、特に Natural Attenuation は濃度減少の予測が難しく、そのために採用することが困難なケースがしばしばある。その原因の一つとして、汚染現場での適用可能性を調べるための土壌カラム実験では、実際の汚染現場の濃度予測に必要なパラメーターが十分に得られないことが挙げられる¹⁾。そこで本研究では、最近、問題となっているガソリンスタンドの古いガソリントankから漏洩する油分に含まれるベンゼンを対象に、様々な土壌カラム実験を行って、一次元の移流に三次元の拡散を考慮した数式モデルに準じたモデル式を用いてベンゼンの流速と分散係数を推定し、その結果を整理する。

2. 実験および解析方法

図1に製作した土壌カラム実験装置を示す。土壌カラムは内径 8.9cm (断面積 $A = 62.2\text{cm}^2$)、カラム長 26cm、土壌層厚 19cm、水層厚 7cm とした。この実験装置に水道水を、ポンプを使って下方から注入し、上方の排水口より採取する。今回参考としたガソリン由来のベンゼン汚染現場の流速 v は $3.3 \times 10^{-4}\text{cm/s}$ であり²⁾、実験の流速をこの値に合わせた。流量 q は $q = v \times A$ より、 $0.021\text{ cm}^3/\text{s}$ ($1.3\text{ cm}^3/\text{min}$)に設定した。

実験条件を以下に記す。

- ・ 注入するベンゼン水溶液の濃度と容量： $4.4\text{mg}/\ell$ ， 20cm^3
- ・ 使用した土壌：豊浦標準砂
- ・ ベンゼンの定量分析：ガスクロマトグラフィー（ヘッドスペース）法

数値解析には、一次元の移流に三次元の拡散を考慮した数式モデル³⁾

に準じた式(1)を使用した。今回は土壌層 19cm、水層 7cm としたため、水槽での移動は完全な押し出し流れとして、水層での移動時間は $7\text{cm}/(3.3 \times 10^{-4}\text{cm/s}) = 21200\text{s} = 5.9\text{h}$ とした。

$$C(x,t) = \frac{C_0 \cdot V_0}{8 \cdot (\pi \cdot t)^{\frac{3}{2}} \cdot (D_x \cdot D_y \cdot D_z)^{\frac{1}{2}}} \cdot \exp\left[-\frac{(x-v \cdot t)^2}{4 \cdot D_x \cdot t}\right] \quad \text{式(1)}$$

ここに、 C_0 ：ベンゼン注入濃度 $4.4\text{ mg}/\ell$

V_0 ：ベンゼン注入容量 20 cm^3

v ：ベンゼン流速 (cm/s) t ：ベンゼン投入後の経過時間から水層での移動時間 5.9h を引いた時間

D_x, D_y, D_z ：分散係数 (x を流れ方向、 y と z を x に直交な方向、 D_y と D_z は D_x の $1/10$ の値⁴⁾)

x ：土壌層の入口からの距離（今回は 19cm のみの解析）

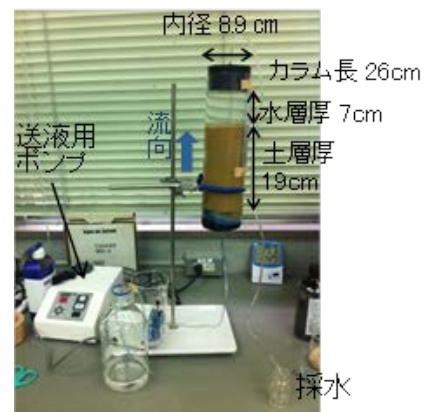


図1 土壌カラム実験装置

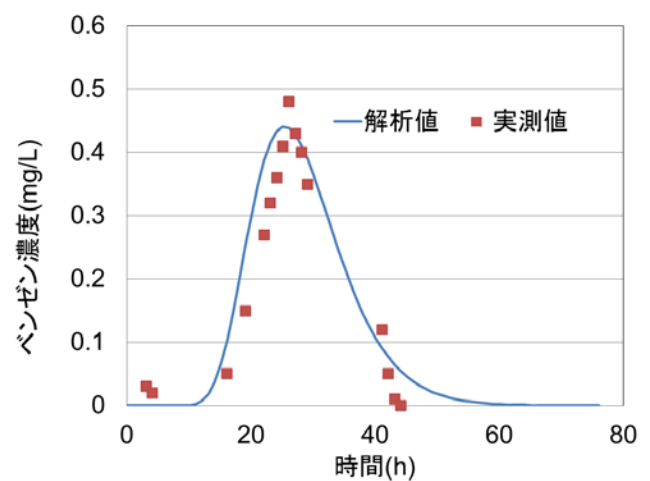


図2 カラム流出口におけるベンゼン濃度の経時変化

3. 実験および解析結果

図2にカラム流出口で採水した流出水中のベンゼン濃度の経時変化および式(1)を用いて計算した予測を示す。最も高濃度のベンゼンが排出されるのは32時間後であり、土壌層を出るのが $32 \cdot 5.9 = 25.1$ 時間となる。その時の濃度は 0.48 mg/l であった。

分散係数 D_x と流速 v を未知数として、実験結果の値を用いて逆解析（最小自乗法）により求めた。その結果、 D_x は $1.1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 v は $1.9 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ となった。

4. 過去の実験結果との比較

2009年から実施した各種の土壌カラム装置および各種の土壌を用いた実験結果より、ベンゼン流速 v と分散係数 D_x の関係を表1に、そのグラフを図3に示す。

表1 各種の土壌カラム実験のベンゼン流量 v と分散係数 D_x の結果のまとめ

No.	注水方法	土壌	カラム内径(cm)	土壌層厚(cm)	ベンゼン流速 v (cm/s)	分散係数 D_x (cm^2/s)	$D_x = \alpha \cdot v$ の α (cm)
1	重力下向流	標準砂	78.5	29	0.12	0.14	1.2
2	重力下向流	標準砂	77.6	36.4	0.082	0.033	0.4
3	重力上向流	グラウンド	32.3	30	0.041	0.014	0.3
4	重力上向流	熊本県	32.3	42	0.38	0.15	0.4
5	ポンプ上向流	熊本県	3.2	25	0.083	0.06	0.7
6	ポンプ上向流	熊本県	3.2	25	0.025	0.026	1.0
7	ポンプ上向流	熊本県	3.2	23	0.29	0.43	1.5
8	ポンプ上向流	熊本県	3.2	23	0.29	0.43	1.5
9	ポンプ上向流	熊本県	3.2	23	0.29	0.18	0.6
10	ポンプ上向流	熊本県	3.2	23	0.038	0.052	1.4
11	ポンプ上向流	熊本県	3.1	40	0.05	0.044	0.9
12	ポンプ上向流	熊本県	3.1	40	0.025	0.015	0.6
13	ポンプ上向流	標準砂	8.9	19	0.00019	0.000094	0.5
14	ポンプ上向流	標準砂	8.9	19	0.00019	0.00011	0.6

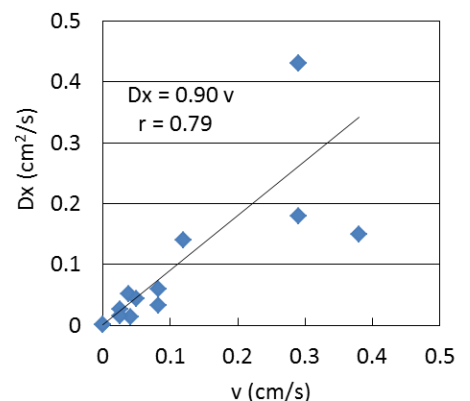


図3 各種の実験によるベンゼン流量 v と分散係数 D_x の関係

表1と図3より v と D_x の関係は、ばらつきはあるものの比例関係で表すことができる。Fetter⁵⁾はこの比例係数 α を動的分散度(Dynamic dispersivity)と呼んでおり、分子拡散係数 D^* との和で実際の分散係数が得られるとしている（式(2)参照⁵⁾）。

$$D_x = \alpha v + D^* \quad \text{式(2)}$$

ここで、ベンゼンの分子拡散係数 D^* は $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ ⁶⁾ と上記の実験範囲では D_x に比べ0.1倍以下となるので、 D_x は v に比例する式となる。

5. 今後の課題

本研究では、ベンゼンの挙動を移流拡散方程式とカラム実験の結果を用いて、半経験的に表現した。わが国での土壌・地下水汚染が問題視されてから20年以上になるが、理論的な解析が必ずしも実際の汚染現場に適用できていないのが現状である。数学的な理論式で表現できる部分と本実験で示したような室内実験で得られるもの、またそのどちらでも得られず、現場で実証せざるを得ないものを分別できれば、今後の土壌・地下水汚染のリスク管理が進むのではないかと考えている。

謝辞：本研究は、建設資源リサイクル研究会の平成24年度研究助成金に基づき行うことができた。

参考文献

- 1) 日本地下水学会：地下水シミュレーション、技法堂出版、2010。
- 2) 高畑ら：地下水・土壌汚染とその防止に関する研究集会、第8回講演集、p.113-116、2002。
- 3) Baetlsé, L. H., "Migration of radionuclides in porous media. In A.M.F. Duhamel Progress in Nuclear Energy Series XII, Health Physics, Pergamon Press, Elmsford, New York, pp.707-730, 1969.
- 4) U.S. EPA: Background Document for the Ground-Water Screening Procedure to Support 40 CFR Part 269 - Land Disposal, EPA/530-SW-86-047, 1986.
- 5) C.W.Fetter: Contaminant hydrogeology, Second edition, Prentice Hall, 1999.
- 6) U.S.EPA: Region9 The screening level (RSL) tables. <<http://www.epa.gov/region9/superfund/prg/>>